

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики
Направление подготовки «Стандартизация и метрология»
Кафедра КИСМ

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка оптоволоконного датчика малых перемещений

УДК 681.586:621.383:002

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ41	Василевская Екатерина Сергеевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. КИСМ	Казakov Вениамин Юрьевич	Канд. физ.- мат. наук		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. менедж. ИСГТ	Конотопский Владимир Юрьевич	Канд. эконом. наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭБЖ	Пустовойтова Марина Игоревна	Канд. хим. наук		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор каф. КИСМ	Стукач Олег Владимирович	Доктор технич. наук		

Томск – 2016 г.

Планируемые результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО 3+, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P1	применять современные базовые и специальные естественнонаучные, математические и инженерные знания для решения инновационных задач метрологического обеспечения, контроля качества, технического регулирования и проверки соответствия с использованием современных технологий, и учитывать в своей деятельности экономические, экологические аспекты и вопросы энергосбережения.	Требования ФГОС 3+ (ОК-1, 8, 9, 10; ПК- 17, 23, 24, 28). Критерий 5 АИОР (п.1.1, 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	выполнять работы по метрологическому обеспечению и техническому контролю, проводить анализ состояния и динамики метрологического и нормативного обеспечения производства, производить оценку качества измерений, контроля и испытаний, проводить работы по автоматизации измерений и контроля в производстве и научных исследованиях.	Требования ФГОС 3+(ОК - 13, ПК - 3, 7, 8, 9, 13, 14). Критерий 5 АИОР (п.1.3, 1.4, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	выполнять работы в области стандартизации и сертификации: выполнять разработку и экспертизу новых технических регламентов и другой нормативной документации, разрабатывать процедуры оценки соответствия, поддерживать единое информационное пространство планирования и управления предприятием на всех этапах жизненного цикла изделий.	Требования ФГОС3+ (ПК-1, 2, 5, 6, 19, 21, 29). Критерий 5 АИОР (п. 1.3, 1.4, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	выполнять работы в области контроля и управления качеством: исследовать причины появления некачественной продукции, разрабатывать предложения по предупреждению и устранению причин брака, осуществлять приемочный и выходной контроль продукции, а также контроль производства на основе современных технических средств.	Требования ФГОС3+ (ПК-4, 12, 14, 15, 21). Критерий 5 АИОР (п. 1.3, 1.4, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P5	использовать базовые знания в области экономики, проектного менеджмента и практики ведения бизнеса, в том числе менеджмента рисков и изменений, для ведения инновационной инженерной деятельности; организовывать работы по защите объектов интеллектуальной собственности и коммерциализации прав на них, проводить технико-экономический анализ по проектам связанным с метрологическим обеспечением производства.	Требования ФГОС3+ (ОК-5, ПК-11, 14, 16, 17, 18, 20, 27, 30). Критерий 5 АИОР (п.2.1, 1.3, 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
<i>Универсальные компетенции</i>		
P6	понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности, заниматься научно-педагогической деятельностью в области метрологии, технического регулирования и управления качеством	Требования ФГОС3+ (ОК-1, 3, 4, 5, ПК-32, 33, 34). Критерий 5 АИОР (п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P7	эффективно работать индивидуально, в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, а также руководить командой, принимать исполнительские решения в условиях спектра мнений, определять порядок работ, демонстрировать ответственность за результаты работы	Требования ФГОС3+ (ОК-11, 12, ПК-20, 22, 32). Критерий 5 АИОР (п.2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P8	владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инженерной деятельности	Требования ФГОС3+ (ОК-14, ПК-26) Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО 3+, критериев и/или заинтересованных сторон
		<i>EURACE и FEANI</i>
P9	ориентироваться в вопросах безопасности и здравоохранения, юридических и исторических аспектах, а так же различных влияниях инженерных решений на социальную и окружающую среду	Требования ФГОС ВПО 3+ (ОК-7, ПК-10, 14, 20.). Критерий 5 АИОР (п.2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P10	следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам инженерной деятельности, проявлять гражданскую позицию, направленную на его совершенствование.	Требования ФГОС ВПО 3+(ОК-6). Критерий 5 АИОР (п.1.6, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики
Направление подготовки (специальность) «Стандартизация и метрология»
Кафедра КИСМ

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
8ГМ41	Василевская Екатерина Сергеевна

Тема работы:

Разработка оптоволоконного датчика малых перемещений	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 3626/с от 19.05.2016 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	15.06.2016
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Наименование объекта проектирования: датчик малых перемещений на базе оптоволоконной технологии с малой погрешностью, материал – оптоволоконно и лазерные источники излучения, фотоприемники, измерение при нормальных условиях, экологически чистый и безопасный в плане эксплуатации
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	Определение структурной схемы устройства, выбор источника и приемника оптического излучения, среды распространения света (оптоволоконна), выбор схемы фотодетектора, конструирование образца устройства, наладка и испытание образца устройства
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Структурная схема устройства, схема фотодетектора
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и	Конотопский Владимир Юрьевич

ресурсосбережение	
Социальная ответственность	Пустовойтова Марина Игоревна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
2.2 Оптическое волокно	
2.2.1 Волоконно-оптические разветвители	
2.2.2 Оптические соединители, типы разъемов (коннекторов)	
2.2.3 Типы полировки	
2.2.4 Потери, ослабление сигнала в оптическом волокне	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	15.10.2014
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. КИСМ	Казаков Вениамин Юрьевич	Канд. физ.-мат. наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ41	Василевская Екатерина Сергеевна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
8ГМ41	Василевской Екатерине Сергеевне

Институт	ИК	Кафедра	КИСМ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Стандартизация и метрология

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала инженерных решений (ИР)	
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения ИР	
3. Обоснование необходимых инвестиций для разработки и внедрения ИР	
4. Составление бюджета инженерного проекта (ИП)	
5. Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности ИР и потенциальных рисков	

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. «Портрет» потребителя
2. Оценка конкурентоспособности ИР
3. Матрица SWOT
4. Модель Кано
5. ФСА диаграмма
6. Оценка перспективности нового продукта
7. График разработки и внедрения ИР
8. Инвестиционный план. Бюджет ИП
9. Основные показатели эффективности ИП
10. Риски ИП

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. менедж. ИСГТ	Конотопский Владимир Юрьевич	Канд. эконом. наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ41	Василевская Е. С.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8ГМ41	Василевской Екатерине Сергеевне

Институт	ИК	Кафедра	КИСМ
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Стандартизация и метрология

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (метеословия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения) – опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы) – негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу) – чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера) 	<p>Основная часть деятельность связана с работой на персональном компьютере (ПК), лазером и пайкой паяльником</p>
<p>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</p>	<p>СанПиН 2.2.4.548 – 96. «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений», СН 2.2.4/2.1.8.562 – 96. «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки», СанПиН 2.2.2/2.4.1340 – 03. Санитарно – эпидемиологические правила и нормативы « Гигиенические требования к персональным электронно – вычислительным машинам и организации работы», СанПиН 2.2.4.1294-03. «Гигиенические требования к аэроионному составу воздуха производственных и общественных помещений», СанПиН 5804-91 «Санитарные правила устройства и эксплуатации лазеров», ГОСТ 12.1.038-82. «Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов», ГОСТ Р 12.1.019-2009. «Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты», ТИ Р М-075-2003 «Межотраслевая типовая инструкция по охране труда для работников, занятых пайкой и лужением изделий паяльником»</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; 	<p>Вредные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 длительное неизменное положение тела; 2 длительное напряжение глаз; 3 длительное воздействие шума; 4 воздействие электромагнитных полей; 5 воздействие электростатических полей

<ul style="list-style-type: none"> – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства) 	
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения) 	<p><i>Опасные факторы</i></p> <p>1 повышенная загазованность воздуха рабочей зоны парами вредных химических веществ;</p> <p>2 пожароопасность;</p> <p>3 повышенная температура поверхности изделия, оборудования, инструмента и расплавов припоев;</p> <p>4 брызги припоев и флюсов;</p> <p>5 опасность поражения электрическим током</p>
<p>3. Охрана окружающей среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	<p>Так как при сборке ПК используются сырье, многое из которого является токсичным, то устройства нельзя утилизировать как бытовые отходы. Возникают следующие виды негативного воздействия на окружающую среду:</p> <ul style="list-style-type: none"> - загрязнение почвы при утилизации ПЭВМ; - выбросы в атмосферу углекислого газа и образование тепла при пожаре
<p>4. Защита в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС на объекте; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий 	<p>Основным видом ЧС является возможность возникновения пожара</p>
<p>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны 	<p>СанПиН 2.2.2/2.4.1340 – 03. Санитарно – эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно – вычислительным машинам и организации работы», Технический регламент 123-ФЗ. «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»</p>
Перечень графического материала:	
<p>При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)</p>	<p>План эвакуации при пожаре и других ЧС</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Пустовойтова Марина Игоревна	Канд. хим. наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ41	Василевская Екатерина Сергеевна		

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт ИК
Направление подготовки (специальность) Стандартизация и метрология
Уровень образования Магистратура
Кафедра Компьютерных измерительных систем и метрологии
Период выполнения (осенний / весенний семестр 2015/2016 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	15.06.2016
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
04.02.2015	Изучение принципа работы интерферометра Фабри-Перо	6
08.04.2015	Изучение видов источников оптического излучения и фотодетекторов	7
15.05.2015	Изучение видов оптоволокну, волоконно-оптических разветвителей, оптических соединителей и их типов разъемов	7
04.11.2015	Определение структурной схемы датчика	15
05.01.2016	Выбор источника и приемника оптического излучения, среды перемещения света (оптоволокну)	10
15.02.2016	Выбор схемы фотодетектора	10
04.03.2016	Конструирование опытного образца устройства	15
05.03.2016	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	5
04.04.2016	Наладка и испытание модели устройства	20
15.05.2016	Социальная ответственность	5
Итого		100

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. КИСМ	Казаков Вениамин Юрьевич	Кандидат физ.-мат. наук		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор каф. КИСМ	Стукач Олег Владимирович	Доктор технич. наук		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 174 с., 90 рис., 25 табл., 37 источников.

Ключевые слова: длина, оптоволокно, датчики, интерферометр Фабри-Перо, интерференция.

Объектом исследования является оптоволоконный датчик перемещения.

Целью данной работы является создание опытного образца, реализующего измерение малых длин на базе волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо и изучение его характеристик.

В процессе исследования проводилось: определение структурной схемы устройства, выбор источника и приемника оптического излучения, среды распространения света (оптоволокна), выбор схемы фотодетектора, конструирование образца устройства, наладка и испытание образца устройства.

В результате исследования был сделан выбор структурной схемы и элементов устройства, сконструирован опытный образец и проведены испытания.

Степень внедрения: на данном этапе изготовлен опытный образец и проводятся испытания.

Данный датчик может быть использован в таких областях промышленности как, например, станкостроении, приборостроении и автомобильной промышленности.

В будущем планируется усовершенствовать конструкцию устройства.

Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

Технический регламент 123-ФЗ. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности

Федеральный закон 7-ФЗ. Об охране окружающей среды

ГОСТ 8.417-2002 ГСИ Единицы величин.

ГОСТ Р 12.1.019-2009 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты

Оглавление

Введение	14
1 Методы измерения малых длин	16
1.1 Длина как физическая величина	16
1.2 Виды датчиков	17
1.3 Интерферометр Фабри-Перо	21
2 Компоненты оптоволоконного датчика	30
2.1 Источники оптического излучения	30
2.1.2 Светодиоды (СИД)	31
2.1.1 Лазерные диоды (ЛД)	36
2.2 Оптическое волокно	41
2.2.1 Волоконно-оптические разветвители	47
2.2.2 Оптические соединители, типы разъемов (коннекторов)	50
2.2.3 Типы полировки	57
2.2.4 Потери, ослабление сигнала в оптическом волокне	59
2.2.5 Дисперсия	63
2.3 Приемники оптического излучения	72
2.3.1 PN-фотодиоды	73
2.3.2 PIN-фотодиоды	77
2.3.3 Лавинные фотодиоды (ЛФД)	78
3 Структурная схема датчика малых перемещений	82
3.1 Первоначальная схема датчика и ее анализ	82
3.2 Метод эталонирования	96
3.3 Компоненты устройства. Наладка и испытание опытного образца	98
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	117
5 Социальная ответственность	131
Заключение	145
Список публикаций	147
Список использованных источников	148
Приложение А. Раздел, выполненный на иностранном языке	151

CD-диск. Магистерская диссертация. (файл Магистерская диссертация.
Василевская Е. С.doc)

174

Введение

Автоматизация производства, повышение требований к качеству выпускаемой продукции, применение автоматизированных систем управления – все это предъявляет достаточно высокие требования к контрольно-измерительным средствам.

Измерение малых линейных перемещений является одной из важнейших задач экспериментальных исследований в различных областях науки и техники. Их контроль является важным элементом правильного функционирования большого числа разнообразных машин, станков. Областью применения данного вида измерений являются контроль деформации, точность механической обработки, контроль деталей с малой поверхностной прочностью, точное позиционирование. В то же время такие величины, как сила, давление, ускорение, температура измеряются с помощью их преобразования в малые перемещения, которые они вызывают в образцах.

Для измерения малых длин (от 1,5 до 100 мкм) существует большое количество методов, основанных на различных физических принципах, например, емкостные, индуктивные, вихретоковые и другие. Однако у данных методов есть существенный недостаток – все они подвержены воздействию электромагнитных помех. Хорошей альтернативой являются оптические методы измерения малых перемещений. Однако применение классических оптических методов затрудняет их сложность и дороговизна.

С появлением оптических кабельных систем связи и лазерных технологий появилась возможность создавать измерительные системы, основанные на применении оптоволокну, фотодетекторов и цифровых технологий. Волоконно-оптические датчики имеют следующие преимущества:

- нечувствительность к внешним электромагнитным полям;
- практически отсутствие перекрестных помех между отдельными волокнами, уложенными вместе в кабель;
- малая масса и габаритные размеры;

- полная электрическая изоляция между входом и выходом системы связи;

- отсутствие коротких замыканий.

Целью данной работы является создание опытного образца, реализующего измерение малых длин на базе волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо и изучение его характеристик.

В соответствии с поставленной целью были решены следующие задачи:

- определение структурной схемы устройства;
- выбор источника и приемника оптического излучения, среды распространения света (оптоволокна);
- выбор схемы фотодетектора;
- конструирование образца устройства;
- наладка и испытание образца устройства.

Первая глава данной работы раскрывает понятие длины как физической величины, определяет понятие малых длин, а также описывает преимущества волоконно-оптических датчиков и поясняет принцип действия интерферометра Фабри-Перо.

Вторая глава посвящена описанию компонентов системы, таких как источники оптического излучения, приемники и собственно оптоволокно.

В третьей главе осуществляется составление структурной схемы устройства, ее описание, выбор компонентов устройства и схемы фотодетектора, а также анализ полученных результатов испытаний опытного образца.

Четвертая глава дает технико-экономическое обоснование работы с целью определения и анализа трудовых и денежных затрат, направленных на реализацию проекта.

В пятой главе рассматривается описание рабочей зоны предназначенной для выполнения ВКР: требования к организации рабочих мест, возможным выбросам, а также правовые вопросы обеспечения охраны труда и пожарной безопасности.

1 Методы измерения малых длин

1.1 Длина как физическая величина

Каждый физический объект имеет ряд характеристик, одной из которых является длина. Если начертить отрезок вида, изображенного на рисунке 1, то расстояние между двумя точками – это будет длина отрезка, соединяющего эти точки.

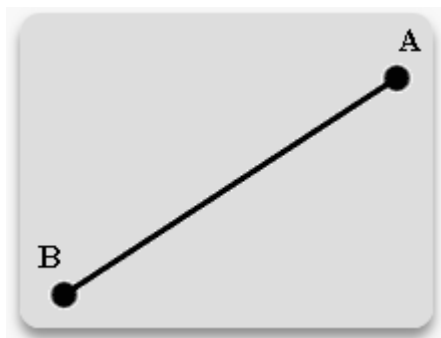


Рисунок 1

Единицей измерения длины является метр, который является одним из семи основных единиц системы измерений. Метр – расстояние, которое проходит свет в вакууме за $1/299792458$ долей секунды (в соответствии с ГОСТ 8.417).

Длина как физическая величина изменяется в широком диапазоне. Например, размеры Вселенной порядка 10^{27} м, расстояние до Солнца 10^9 м, рост ребенка порядка одного метра, размер крупинки соли – 10^{-4} м, радиус атома 10^{-10} м.

Для каждой выделенной группы существуют определенные средства измерений (СИ). Например, к СИ, измеряющим длину малого диапазона, относятся микрометры, нанометры и т.д., которые невозможно и нецелесообразно применить при измерении длин большого диапазона. Также в зависимости от типа измерений существуют свои допуски на измерения. Например, в измерениях малых длин погрешность может быть несколько микронов, в случае измерения же космических расстояний погрешность может достигать нескольких километров.

В данной работе обсуждаются устройства измерения малых длин порядка 10^{-6} и 10^{-9} метра.

1.2 Виды датчиков

Для измерения расстояния до объектов используются разнообразные датчики, различающиеся по принципу действия, точности, диапазону и другим параметрам.

В зависимости от принципа действия датчики измерения длин могут быть:

- емкостные;
- оптические;
- индуктивные;
- вихретоковые;
- ультразвуковые;
- магниторезистивные;
- потенциометрические;
- магнитострикционные;
- и др.

Сравнительная характеристика некоторых из приведенных выше методов измерения представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика датчиков

Тип датчика	Характеристики			
	диапазон измерения	разрешающая способность	материал объекта	способ измерения
емкостные	от 0 до 25 мм	нет данных	металлические и неметаллические	бесконтактный
индуктивные	от 0 до 20 мм	0,005 мм	металлические	бесконтактный
вихретоковые	от 0.5 до 10 мм	0,1 мкм	металлические	бесконтактный
ультразвуковые	от 10 до 10000 мм	0,20 мм	несильно поглощающий	бесконтактный
потенциометрические	от 25 до 250 мм	0,01 мм	нет данных	нет данных
магнитострикционные	от 0 до 5500 мм	2 мкм	нет данных	бесконтактный

Основной недостаток рассмотренных методов (кроме оптических) измерения длин – измерительные системы подвержены воздействию электромагнитных наводок, воздействие которых может существенно исказить выходной сигнал (информацию). Один из плюсов оптических методов – это их нечувствительность к внешним электромагнитным полям.

В настоящее время создано большое количество датчиков, в основу которых положено использование оптических эффектов. Прецизионная оптика и механика делает такие датчики достаточно дорогими и немобильными. Развитие оптоволоконной и лазерной технологий позволило преодолеть данные недостатки при сохранении базовых свойств. Постепенное удешевление элементной базы и повышение доступности позволяет использовать их повсеместно.

Одним из достоинств датчиков, основанных на волоконно-оптической технологии, является их *электрическая пассивность*. Так как проводником сигнала является стекло, которое по своей природе является диэлектриком, то, при расположении датчика в условиях повышенных потенциалов, его не нужно будет изолировать. Кроме этого кварц довольно *устойчив к коррозии* по сравнению с металлическими проводниками. Еще одно достоинство, которое иногда может быть решающим, – это *устойчивость к электромагнитным помехам*. В отличие от волоконно-оптических датчиков, обычные (электрические или электронные) типы датчиков подвержены данному воздействию, поэтому в данных условиях для них характерно повышение шумового фона.

Волоконно-оптические датчики (ВОД) делятся на два типа:

- датчики, в которых волокно используется в качестве линий передачи сигнала;
- датчики, в которых волокно является чувствительным элементом [1].

Принцип действия ВОД основан на измерении изменения таких параметров оптического сигнала, как:

- амплитуда сигнала;

- частота сигнала;
- начальная фаза сигнала и др.

Наиболее чувствительные датчики, использующие оптическое излучение, могут быть построены на основе схем, регистрирующих изменения фазы электромагнитной волны, распространяющейся по оптическому каналу. Эти изменения регистрируются интерферометрическим методом при наложении сигналов измерительного и контрольного каналов.

Принцип действия интерферометра основан на явлении интерференции и заключается в следующем: пучок электромагнитного излучения с помощью того или иного устройства пространственно разделяется на два или большее количество когерентных пучков. Каждый из пучков проходит различные оптические пути и возвращается на экран, создавая интерференционную картину, по которой можно установить смещение фаз пучков (пояснение приведено на рисунке 2) [2].

Фаза света на выходе характеризуется величиной, определяемой по формуле (1).

$$\varphi = \beta l, \quad (1)$$

где β – постоянная распространения света в вакууме, равная $\beta = 2\pi n / \lambda_0$ (λ_0 – длина волны света в вакууме).

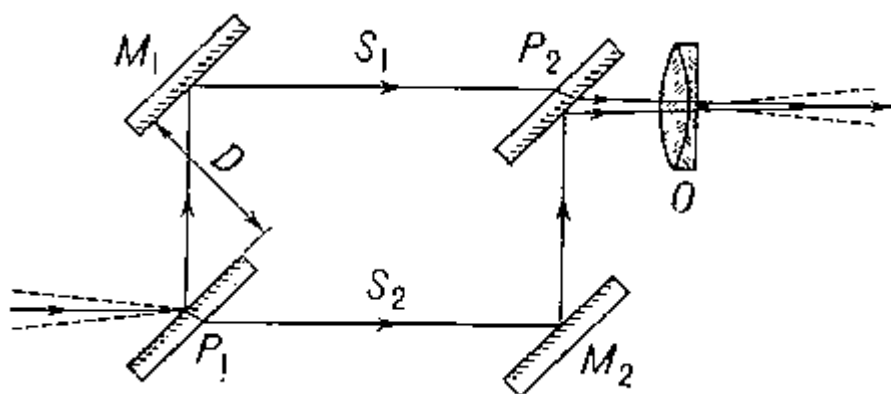


Рисунок 2 – Схема интерферометра

Следовательно, фаза света определяется по формуле (2).

$$\varphi = 2\pi n l / \lambda_0. \quad (2)$$

Внешние факторы, которые могут изменить показатель преломления n и длину l , ведут к изменению фазы проходящего через волокно света.

Приложение механического напряжения вызывает незначительные изменения поперечного сечения световода и его показателей преломления. Основной вклад в изменение фазы вносит изменение длины световода. Изменение температуры, давления, а также магнитного поля и скорости вращения витка световода тоже приводят к изменению фазы колебания.

Датчики фазовой модуляции строятся по одной из наиболее распространенных схем:

- на основе интерферометра Маха — Цендера;
- известно также использование схемы интерферометров Фабри-Перо и Майкельсона.

Явление интерференции света лежит в основе многих высокоточных измерительных систем и датчиков перемещения. Использование оптических волокон позволяет сделать такие устройства чрезвычайно компактными и экономичными. Известны две основные схемы волоконно-оптических интерферометров: Маха-Цендера и Фабри-Перо. В волоконно-оптическом интерферометре Фабри-Перо интерференция происходит на частично отражающем сколе волокна и внешнем отражателе. Размер чувствительного элемента датчика перемещений, основанного на этом принципе, сопоставим с диаметром волоконного световода, т.е. около 0,1 мм, а его чувствительность может достигать долей ангстрема. При этом сам чувствительный элемент помехоустойчив к внешним электромагнитным наводкам [3].

В целом фазовые (интерферометрические) датчики являются весьма сложными оптическими преобразователями, практическая реализация которых в определенной мере сдерживается наличием фазовых шумов, возникающих из-за ухода частоты излучения лазерных источников и изменений эффективной длины пути оптических лучей в контрольном плече интерферометра.

1.3 Интерферометр Фабри-Перо (ИФП)

К приборам высокой разрешающей способности относятся спектральные приборы, имеющие разрешение порядка 0,1 нм и менее. К ним и относится интерферометр Фабри-Перо.

Действие интерферометра основано на многократном отражении света двумя параллельными плоскими зеркалами и интерференции выходящих из этой системы лучей света (рисунок 3). Обычно ИФП состоит из двух близко расположенных полупрозрачных отражателей (в роли которых выступают зеркала, пластинки из стекла), расположенных с каждой стороны оптически прозрачной среды (часто воздуха). При этом часть света проходит через полупрозрачное зеркало, а часть отражается от него каждый раз, когда свет достигнет второй поверхности. В результате образуются множество смещенных лучей, которые могут интерферировать друг с другом.

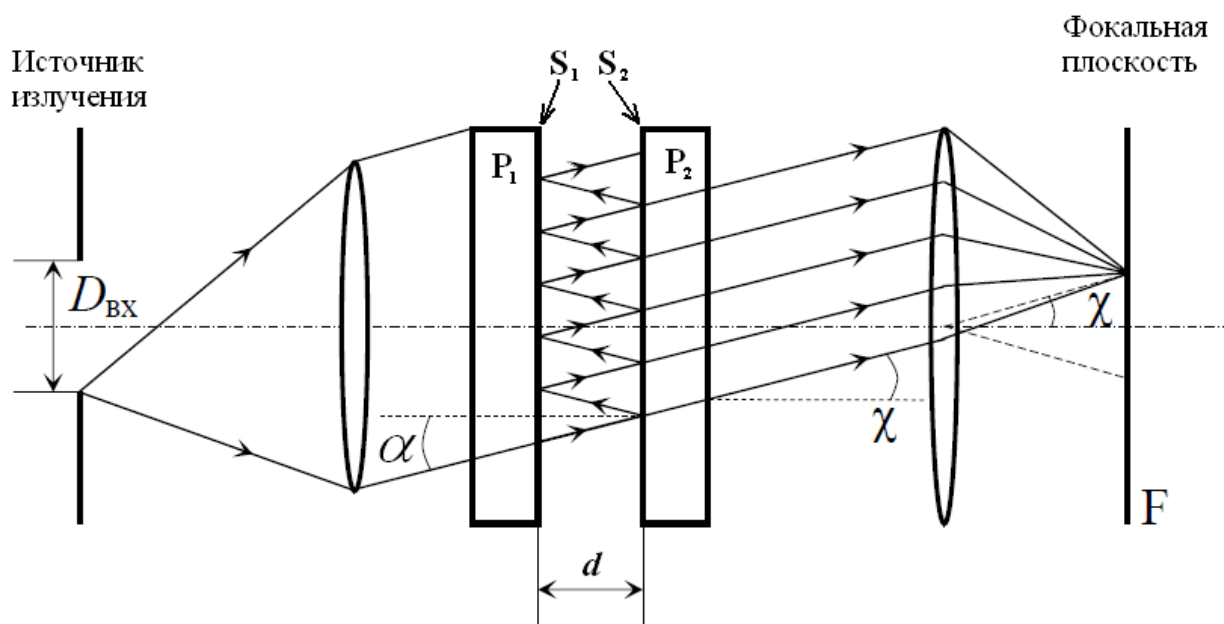


Рисунок 3 – Интерферометра Фабри-Перо с воздушным промежутком

В данной конструкции ИФП оптически однородный воздушный плоскопараллельный слой, толщиной d , образуется поверхностями S_1 и S_2 , принадлежащих разным пластинам P_1 и P_2 (рисунок 3). На внутренних обращенных друг к другу плоскостях S_1 и S_2 также нанесены отражающие полупрозрачные слои – зеркала с высоким коэффициентом отражения [4]. Расстояние d между отражающими поверхностями ИФП называют его базой.

Поток света, падающего на интерферометр можно представить в виде множества параллельных пучков света, которые выходят из разных точек источника излучения. Из-за многократного отражения от зеркальных поверхностей происходит расщепление каждого падающего пучка света на бесконечное число интерферирующих лучей с постоянной разностью фаз. При этом если учесть, что коэффициент отражения у зеркал меньше единицы, то интенсивность каждого последующего отраженного когерентного луча света будет меньше предыдущего. Будучи сфокусированными линзой, интерференционные полосы образуют концентрические кольца.

Разность хода Δ_0 , мм между соседними когерентными лучами, выходящими из плоскопараллельного слоя, образованными стеклянными пластинами конечной толщины, будет рассчитано по формуле (3).

$$\Delta_0 = 2 \cdot d \cdot n_c \cdot \cos \alpha, \quad (3)$$

где d – расстояние между пластинами, мм;

n_c – показатель преломления среды между зеркалами (для воздуха $n = 1$);

α – угол между лучом и нормалью к зеркалам.

Луч света после прохождения через плоскопараллельную пластинку выходит из нее под углом к оси интерферометра $\chi = \alpha$. При этом интерференционный максимум Δ_{\max} , мм для каждой длины волны определяется по формуле (4).

$$\Delta_{\max} = k \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot n_c \cdot \cos \chi_{\max}, \quad (4)$$

где k – целое число.

Это равенство означает, что интерференционный максимум образуется в направлениях χ_{\max} , для которых разность хода между соседними когерентными пучками равна целому числу длин волн.

Посередине между двумя соседними максимумами имеется минимум Δ_{\min} , мм, положение которого определяется по формуле (5).

$$\Delta_{\min} = (k + 1/2) \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot n_c \cdot \cos \chi_{\min}. \quad (5)$$

Рассмотрим случай, когда оба зеркала данного интерферометра разделены воздушным промежутком. Пусть коэффициенты отражения,

пропускания и поглощения идентичных зеркал соответственно равны r , τ и ε , причем по закону сохранения энергии следует $r+\tau+\varepsilon=1$. Так как введенные ранее коэффициенты рассматриваются для интенсивности излучения (для квадрата амплитуды светового излучения), то коэффициенты отражения и пропускания для амплитуд будут соответственно равны \sqrt{r} и $\sqrt{\tau}$. А это значит, что после каждого отражения от зеркальной поверхности светового пучка амплитуда световой волны уменьшится в \sqrt{r} раз, а после его прохождения через зеркальный слой – в $\sqrt{\tau}$ раз. Значение ε примем равным 0.

Уравнение светового колебания для падающей на интерферометр волны может быть записано в виде формулы (6).

$$E = E_0 \cdot \exp[i \cdot (\omega \cdot t + \varphi_0)], \quad (6)$$

где E_0 – амплитуда волны, м;
 ω – круговая частота, рад/с;
 t – время, с;
 φ_0 – фаза колебания, рад.

Найдем уравнения, описывающие когерентные волны, прошедшие слой, с учетом их амплитуд и фаз. Итак, амплитуда волны E_1 , м первого пучка, прошедшего через два зеркальных слоя без отражений, рассчитывается по формуле (7).

$$E_1 = \tau \cdot E_0 \cdot \exp[i \cdot (\omega \cdot t + \varphi_1)]. \quad (7)$$

Для второго пучка амплитуда волны E_2 , м, который кроме двух прохождений через зеркала испытал два отражения, рассчитывается по формуле (8).

$$E_2 = \tau \cdot r \cdot E_0 \cdot \exp[i \cdot (\omega \cdot t + \varphi_1 + \delta)], \quad (8)$$

где $\delta=2\pi\Delta_0/\lambda$ – изменение фазы колебания в результате прохождения пучком разности хода Δ_0 [5].

Тогда амплитуда волны E_k , м k -того пучка света, рассчитывается по формуле (9).

$$E_k = \tau \cdot r^{k-1} \cdot E_0 \cdot \exp\{i \cdot [\omega \cdot t + \varphi_1 + (k-1)\delta]\}. \quad (9)$$

Результирующее колебание, возникающее при сложении бесконечно большого числа когерентных колебаний с амплитудами, убывающими в геометрической прогрессии, и с постоянной разностью фаз соседних волн, характеризуется амплитудой E , и рассчитывается по формуле (10).

$$E = \sum_{k=1}^{\infty} E_k = \tau \cdot E_0 \cdot \exp[i \cdot (\omega \cdot t + \varphi_1)] \cdot \sum_{k=1}^{\infty} r^{k-1} \cdot \exp[i(k-1)\delta]. \quad (10)$$

Суммирование дает формулу (11), вида:

$$E = \frac{\tau \cdot E_0 \cdot \exp[i \cdot (\omega \cdot t + \varphi_1)]}{1 - r \cdot e^{i\delta}}, \quad (11)$$

Для нахождения интенсивности света I , Вт/м², прошедшего через интерферометр, умножим данную величину на комплексно-сопряженную. В итоге получаем формулу (12), которая называется формулой Эйри.

$$I = E \cdot E^* = I_0 \frac{\tau^2}{(1-r)^2 + 4 \cdot r \cdot \sin^2(\delta/2)}, \quad (12)$$

где I_0 – начальная интенсивность излучения, Вт/м².

Функция $I(\delta)=I(\lambda, \alpha)$ для монохроматического излучения, очевидно, является *аппаратной функцией* интерферометра, причем при данной толщине ИФП максимум этой функции тем уже, чем больше r . График этой функции для разных значений r изображен на рисунке 4.

Из формулы (12) и рисунка 4 видно, при заданной одной длине волны λ зависимость функции I от $\delta=2\pi\Delta_0/\lambda$ (или от изменения угла α) имеет колебательный характер, причем максимум $I(\delta)$ наблюдается при $\sin(\delta/2)=0$, т. е. когда $\delta/2=k\pi$, что соответствует ранее указанному выражению $\Delta_{\max} = k \cdot \lambda$. Это показано в формулах (13), (14) и (15).

$$\Delta_{\max} = k \cdot \lambda, \quad (13)$$

$$\delta = 2 \cdot \pi \cdot \Delta_{\max} / \lambda, \quad (14)$$

$$\frac{\delta}{2} = \pi \cdot \frac{\Delta_{\max}}{\lambda} = \pi \cdot \frac{k \cdot \lambda}{\lambda} = \pi \cdot k. \quad (15)$$

Интенсивность в максимуме I_{\max} , Вт/м² при этом рассчитывается по формуле (16).

$$I_{\max} = \frac{I_0 \cdot \tau^2}{(1-r)^2} = \frac{I_0 \cdot \tau^2}{(\tau + \varepsilon)^2}. \quad (16)$$

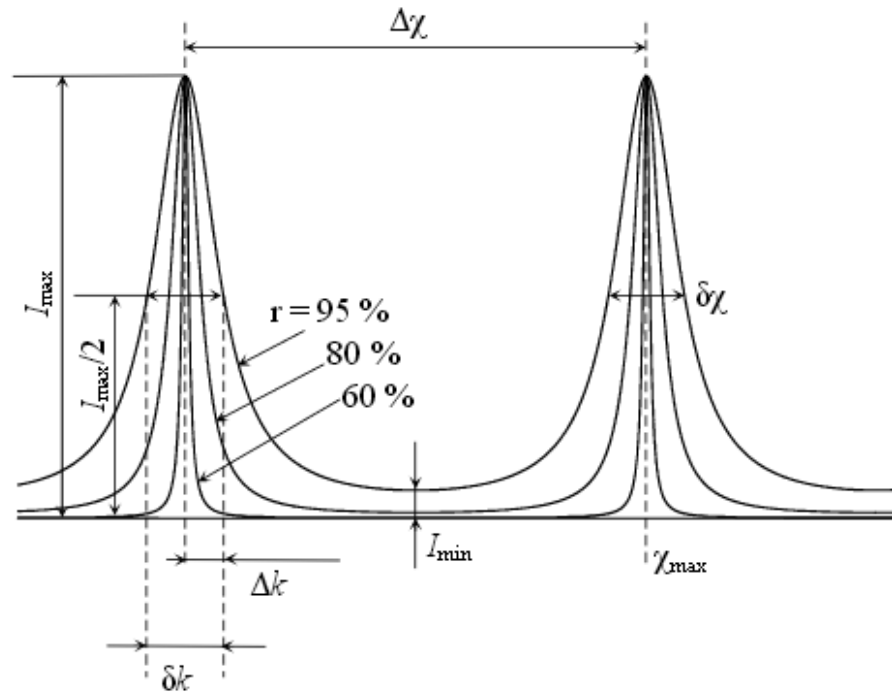


Рисунок 4 – График изменения интенсивности света, прошедшего через ИФП, $I(\lambda, \alpha)$ для различных значений коэффициентов отражения зеркал r

Минимум аппаратной функции наблюдается при $\sin(\delta/2) = 1$. Минимальная интенсивность прошедшего света I_{\min} , Вт/м² при этом рассчитывается по формуле (17).

$$I_{\min} = \frac{I_0 \cdot \tau^2}{(1+r)^2}. \quad (17)$$

Отметим, что функция $I(\lambda, \alpha)$ нигде не обращается в нуль. Это связано с различной интенсивностью когерентных пучков, которые при интерференции не могут полностью «гасить» друг друга.

Соотношение интенсивностей в максимуме и минимуме аппаратной функции $\gamma = I_{\max} / I_{\min}$ называют *контрастностью* интерферометра Фабри-Перо. Она рассчитывается по формуле (18).

$$\gamma = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \left(\frac{1+r}{1-r} \right)^2. \quad (18)$$

Функция *видности* $V=(I_{\max}-I_{\min})/(I_{\max}+I_{\min})$ зависит только от коэффициента отражения зеркал r и определяется по формуле (19).

$$V = \frac{2r}{(1+r)^2}. \quad (19)$$

При анализе эталона было сделано предположение об идентичности обоих зеркал и их идеальном отражении. Практически коэффициенты отражения обоих зеркал могут быть разными. В этом случае контрастность γ и видность V рассчитываются по формулам (20) и (21) соответственно.

$$\gamma = \frac{(1 + \sqrt{r_1 \cdot r_2})^2}{(1 - \sqrt{r_1 \cdot r_2})^2}, \quad (20)$$

$$V = \frac{2\sqrt{r_1 \cdot r_2}}{(1 + \sqrt{r_1 \cdot r_2})^2}. \quad (21)$$

В случае, когда отсутствуют потери на поглощение в зеркалах, и вся посылаемая источником излучения энергия проходит через интерферометр, тогда $1-r=\tau$ и $I_{\max}=I_0$. Величина T обычно называется *пропусканием* ИФП в максимуме и рассчитывается по формуле (22). Она зависит от коэффициента поглощения отражающих слоев $\varepsilon=1-r-\tau$, причем для больших r эта зависимость становится более сильной.

$$T = \frac{\tau^2}{(1-r)^2}. \quad (22)$$

Найдя отношение интенсивности прошедшего через интерферометр света I к максимальной интенсивности I_{\max} , которые определяются по формулам (12) и (16), соответственно, найдем распределение интенсивностей. Оно определяется по формуле (23) в относительных единицах:

$$\frac{I}{I_{\max}} = \frac{1}{1 + \frac{4 \cdot r}{(1-r)^2} \cdot \sin^2(\delta/2)} = \frac{1}{1 + \eta^2 \cdot \sin^2(\delta/2)}, \quad (23)$$

где величину η называют коэффициентом, или фактором, *резкости*, так как именно она определяет резкость интерференционной картины и ширину аппаратной функции интерферометра Фабри-Перо.

Коэффициент резкости η рассчитывается по формуле (24)

$$\eta = \frac{2 \cdot \sqrt{r}}{1 - r}, \quad (24)$$

где r – коэффициент отражения зеркал при отсутствии потерь на поглощение.

Так как коэффициент отражения r может изменяться от 0 до 1, то с его увеличением (при приближении его значения к единице) интенсивность минимумов интерференционной картины в прошедшем свете уменьшается, а максимумы становятся более резкими. При приближении r к единице весь свет практически сосредотачивается в узких интерференционных полосах на темном фоне. В отраженном свете получают столь же резкие темные полосы на светлом фоне.

Обычно считают, что интерферометр Фабри-Перо разрешает две линии, расположенные на расстоянии $\delta\lambda$, равном полуширине этих линий (рисунок 4). Для нахождения $\delta\lambda$ воспользуемся формулой (23), положив в ней $I/I_{\max}=1/2$. Тогда формула (23) после подстановки преобразуется в формулу (25).

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{1 + \frac{4 \cdot r}{(1 - r)^2} \cdot \sin^2(\delta/2)} \quad (25)$$

Если максимум аппаратного контура соответствует $\delta/2 = k \cdot \pi$, то в точке контура, где $I = 0.5 I_{\max}$, соответствует $\delta/2 = (k + \Delta k) \cdot \pi$ (Δk — небольшая дробная доля порядка). Очевидно, что для малых Δk (т.е., для малых ширин аппаратной функции, которые реализуются при больших r):

$$|\sin[(k + \Delta k) \cdot \pi]| = |\sin \Delta k \cdot \pi| \approx \Delta k \cdot \pi.$$

Подставляя в формулу (25) $\sin^2(\delta/2) = (\Delta k \cdot \pi)^2$, найдем значение Δk , которое определяется по формуле (26).

$$\Delta k = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1 - r}{\sqrt{r}}. \quad (26)$$

Расстояние δk между двумя линиями, находящимися на пределе разрешения, выраженное в долях порядка, равно удвоенному расстоянию Δk и определяется по формуле (27).

$$\delta k = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1 - r}{\sqrt{r}} = \frac{2}{\pi \cdot \eta}. \quad (27)$$

Это расстояние δk представляет собой *ширину аппаратной функции* интерферометра Фабри-Перо. Выразим эту ширину в угловой мере (рисунок 4). Угловая ширина *аппаратной функции* $\delta\chi$ определяется по формуле (28).

$$\delta\chi = \frac{\lambda}{\pi \cdot \eta \cdot d \cdot \sin \chi}. \quad (28)$$

По этой формуле видно, что $\delta\chi$ зависит не только от коэффициента резкости η , но и от расстояния d (базы ИФП) и от угла χ , при увеличении которых $\delta\chi$ уменьшается.

В соответствии с общими правилами теоретическая **разрешающая способность** ИФП определяется соотношением $R = \lambda / \delta\lambda$. Чтобы определить R заметим, что для малых углов падения света на ИФП, значение k рассчитывается по формуле (29).

$$k = \frac{2 \cdot d}{\lambda}. \quad (29)$$

Продифференцировав формулу (29) получим формулу (30).

$$\lambda \cdot \delta k + k \cdot \delta\lambda = 0. \quad (30)$$

Тогда из получившейся формулы (30) получаем формулу (31) следующего вида:

$$R = \lambda / \delta\lambda = |k / \delta k|. \quad (31)$$

Подставляя в формулу (31) значения k из формулы (29) и δk из формулы (27), определим, что разрешающая способность R определяется по формуле (32).

$$R = \frac{2 \cdot \pi \cdot d}{\lambda} \cdot \frac{\sqrt{r}}{1-r}. \quad (32)$$

Минимальный разрешимый интервал $\delta\lambda$, выраженный в длинах волн, будет рассчитываться по формуле (33).

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2 (1-r)}{2 \cdot \pi \cdot d \sqrt{r}}. \quad (33)$$

При больших значениях коэффициентов отражения зеркал можно заменить \sqrt{r} единицей и воспользоваться формулой (34) – приближенным выражением (с точностью до нескольких процентов)

$$R = \frac{2 \cdot \pi \cdot d}{\lambda} \cdot \frac{1}{1-r} \approx \frac{6 \cdot d}{\lambda \cdot (1-r)}. \quad (34)$$

Исходя из полученной формулы, можно сказать, что разрешающая способность R зависит от коэффициента отражения зеркал r и расстоянию между ними d . При больших значениях r и d величина R оказывается очень большой. Так, при $r=0,9$, $\lambda=500$ нм и $d=10$ мм $R \approx 1,2 \cdot 10^6$, а минимально разрешимый интервал длин волн $\delta\lambda \approx 4 \cdot 10^{-4}$ нм.

Разрешающую способность выгодно увеличивать за счет повышения коэффициента отражения зеркал. Например, при увеличении r от 0,7 до 0,98 разрешающая способность возрастет в 18 раз, а увеличение r от 0,95 до 0,98 увеличивает R почти в 3 раза. Разрешающая способность интерферометра в значительной мере зависит от качества его зеркал. В реальных условиях непараллельность зеркал и дефекты их поверхности вносят искажение в угловое распределение светового потока, расширяя интерференционные максимумы и меняя их форму.

2 Компоненты оптоволоконного датчика

В данной главе рассматриваются основные элементы, необходимые для конструирования оптоволоконного датчика малых перемещений, такие как источники и приемники оптического излучения, оптоволокно.

На каждом конце волоконно-оптической линии находится преобразователь, который преобразует энергию одного типа в другой. При этом источник – это электронно-оптический преобразователь (преобразует электрический сигнал в оптический), а фотодетектор, расположенный на другом конце оптоволоконна, – это оптоэлектронный преобразователь (обратно преобразует оптический сигнал в электрический). Средой перемещения сигнала является оптоволокно.

2.1 Источники оптического излучения

Источники оптического излучения относят к базовым элементам волоконно-оптической линии связи. Он должен удовлетворять следующим требованиям:

- излучение должно вестись на длине волны одного из окон прозрачности волокна. Существует три окна, в которых достигается меньшие потери света при распространении: 850, 1300, 1500 нм;
- источник излучения должен выдерживать необходимую частоту модуляции для обеспечения передачи информации на требуемой скорости;
- источник излучения должен эффективно сопрягаться с маленьким диаметром сердечника (до 8,5 мкм для одномодовых волокон), в том смысле, что большая часть излучения источника попадала в волокно с минимальными потерями;
- источник излучения должен иметь достаточно большую мощность излучаемого света, чтобы сигнал можно было передавать на большие расстояния;
- температурные вариации не должны сказываться на функционировании источника излучения;

– стоимость производства источника излучения должна быть относительно невысокой;

– иметь высокую надежность, быть небольшим и легким.

В настоящее время наиболее распространенными источниками излучения являются два основных типа – это различные полупроводниковые светодиоды (СД или LED) и лазерные диоды (ЛД или LD), из которых в волоконной оптике используются только некоторые из разновидностей. Параметры данных устройств определяют характеристики систем передачи, поэтому должны отвечать выдвигаемым ими требованиям. Светодиоды и лазерные диоды удовлетворяют многим из перечисленных выше требований.

2.1.1 Светодиоды (СИД)

Светоизлучающими диодами (СИД) называются такие диоды с электронно-дырочными переходами, которые при приложении напряжения испускают оптическое излучение.

Обычный светодиод изготавливают путем соединения двух полупроводников разного типа, каждый из которых содержит примеси, которые придают ему соответствующие электрические характеристики. Область р-типа содержит примеси, в которых электронов меньше, чем атомов в кристаллической решетке, поэтому содержит атомы с избыточным положительным зарядом. Они известны как «дырки», так как создают для электронов возможность перемещаться по кристаллической решетке. Для области n-типа используют примеси, содержащие в кристаллической решетке избыточное количество электронов по сравнению с атомами. Эти области являются «донорами» электронов [6].

При приложении положительного напряжения к р-области, а отрицательного к n-области (рисунок 5), электроны и дырки движутся навстречу друг другу и мигрируют через *зону перехода*. В результате захвата электронов дырками (при объединении электрона с дыркой), атом возвращается

в нейтральное состояние и образуется энергия, преобразующаяся в световую энергию в виде фотонов.

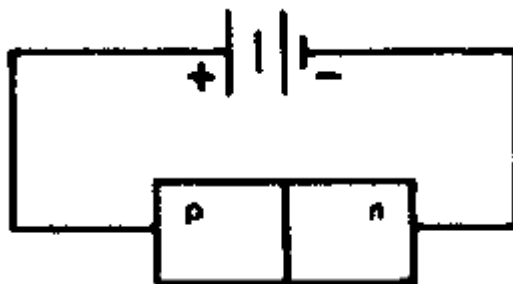


Рисунок 5 – Светодиод

Итак, в простейшем случае излучаемая светодиодом энергия образуется при рекомбинации электронов и дырок и их переходе из зоны проводимости в валентную зону, которые вводятся прямым смещающим напряжением (рисунок 6 и рисунок 7). Размер запрещенной зоны определяет энергию излученного фотона.

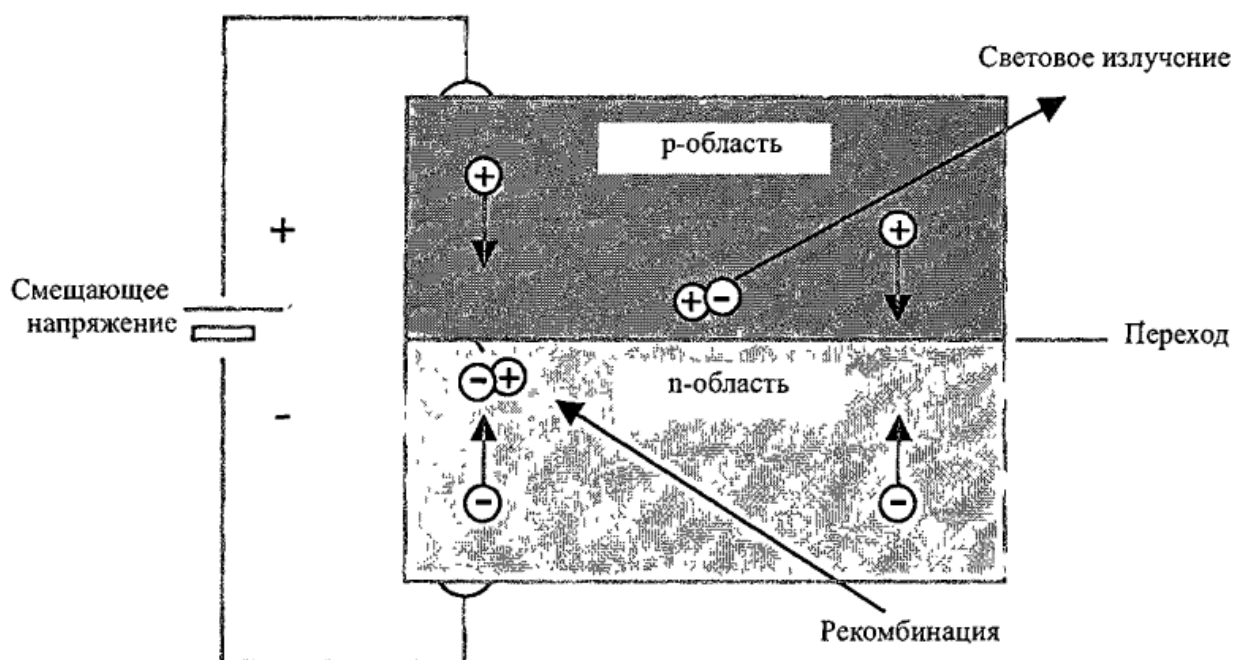


Рисунок 6 – Принцип действия светодиода

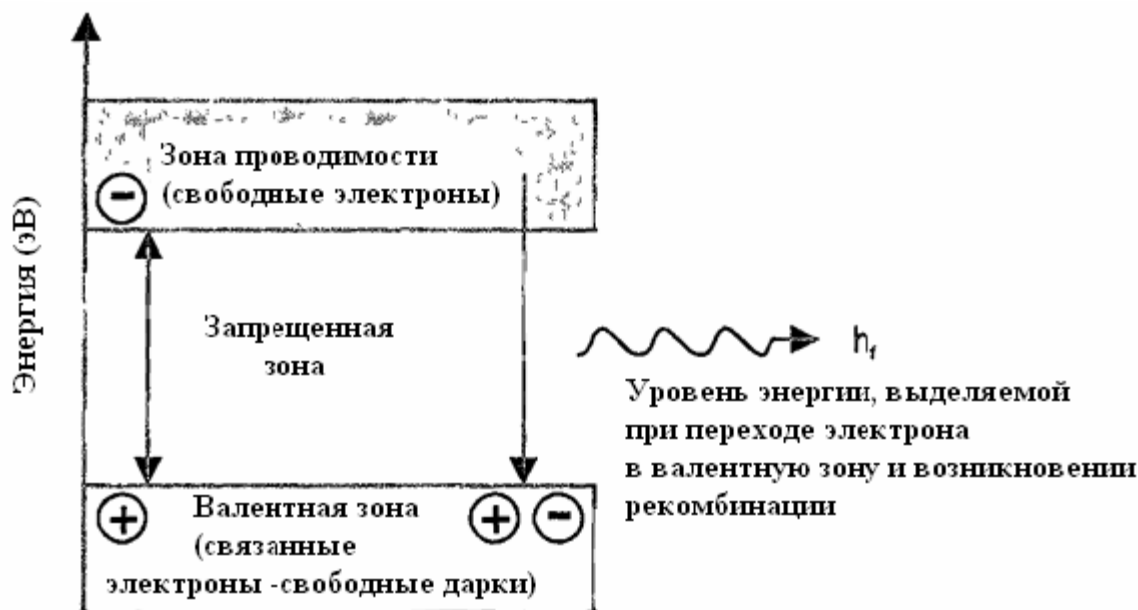


Рисунок 7 – Запрещенная зона определяет выделение энергии

С точки зрения геометрии существуют два основных типа СИД: с поверхностным излучением и с торцевым излучением (излучающим срезом). Они классифицированы в зависимости от того, излучает ли светодиод свет из поверхности, которая параллельна плоскости перехода, или из среза области перехода (рисунок 8). Излучение диодов с поверхностным излучением изотропно, и свет улавливается путем присоединения волокна встык в непосредственной близости к излучающей поверхности. Как правило, такие СИД используют в сочетании с многомодовыми волокнами, при этом захватывается несколько процентов излученного света. Диоды с излучающим торцом генерируют свет в тонком узком активном слое, при этом толщина зоны излучения может составлять всего несколько микрон и шириной порядка десяти микрон. Структура такого СИДа позволяет ограничивать выход света и направлять его к одному концу устройства. Они обычно дают меньше выходящего света, чем поверхностно-излучающие светодиоды, из-за меньшей поперечной площади активной излучающей зоны, но пучок более эффективно направляется в волокно.

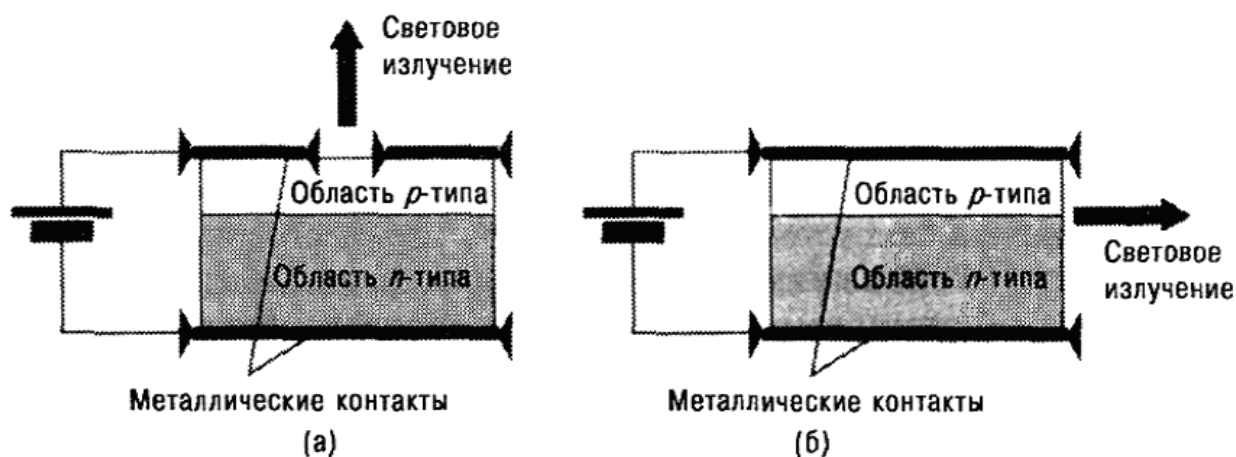


Рисунок 8 – Поперечный срез СИДа с излучающей поверхностью (а) и СИДа с излучающим срезом (б)

Обычно СИД с излучающей поверхностью дешевы и применяются в волоконно-оптических измерительных системах там, где невысоки требования к интенсивности света и в качестве средства передачи используется многомодовое волокно.

Для систем, работающих с большей мощностью и требующих применение одномодовых волокон, применяются светодиоды с излучающим срезом.

СИД характеризуются практически линейной зависимостью мощности излучения от тока возбуждения. На рисунке 9 изображен график зависимости выходной мощности СИДа с излучающим срезом от токовой характеристики. На нем видно, что оптическая мощность медленно увеличивается при увеличении уровня тока. По мере старения СИДов их выходная мощность снижается. Хорошие светодиоды должны иметь срок службы около 10^5 часов (около 11 лет). Срок службы – это время, в течение которого его световое излучение до половины первоначального значения (то есть уменьшается на 3 дБ в основной рабочей длине волны). Например, СИД, имеющий первоначальную выходную мощность 1 мВт, заканчивает свою службу при уровне мощности в 500 мкВт.

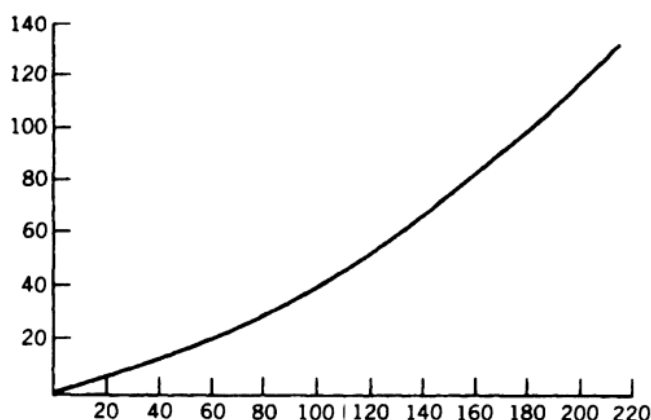


Рисунок 9 – Зависимость выходной мощности СИДа с излучающим срезом от токовой характеристики

Суммарная излучаемая мощность распределяется по диапазону длин волн, сгруппированных вокруг основной длины волны. Это оценивается величиной ширины спектра $\Delta\lambda$, который достаточно широк для светодиодов.

Типичный светодиод, работающий на длине волны 850 нм, имеет ширину спектра 40 нм, а светодиод, работающий на длине волны 1300 нм, – ширину примерно 80 нм. Большие значения ширины спектра вызывают повышение хроматической дисперсии светового импульса по мере его продвижения по волокну [6]. На рисунке 10 изображен спектр излучения GaAlAs-светодиода, рабочая длина волны которого составляет от 0,8 мкм до 0,9 мкм. Яркость определяется площадью под кривой и равна приблизительно 10^2 Вт/(см²*стер).

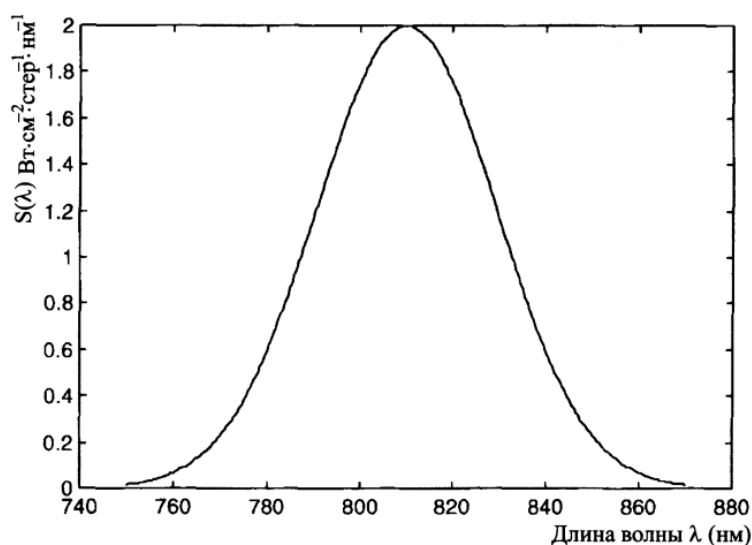


Рисунок 10 – Спектр излучения GaAlAs-светодиода

Значение ширины спектра используется как параметр, характеризующий монохроматичность источника излучения. Для светодиодов характерен механизм спонтанного излучения, которое обладает низкой монохроматичностью. Его называют *некогерентным* светом. Когерентными источниками света называются такие источники, которые излучают синфазные световые волны. К таким источникам относятся лазерные диоды, рассмотренные ниже [7].

2.1.2 Лазерные диоды (ЛД)

Слово лазер (LASER) является аббревиатурой от Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation (усиление света за счет вынужденного излучения). Светодиоды и лазеры используют очень схожие принципы действия.

Строение лазера очень сходно со строением светодиода с излучающим срезом. Он имеет узкую активную область с добавлением отражающих концов и отражающих сторон (рисунок 11).

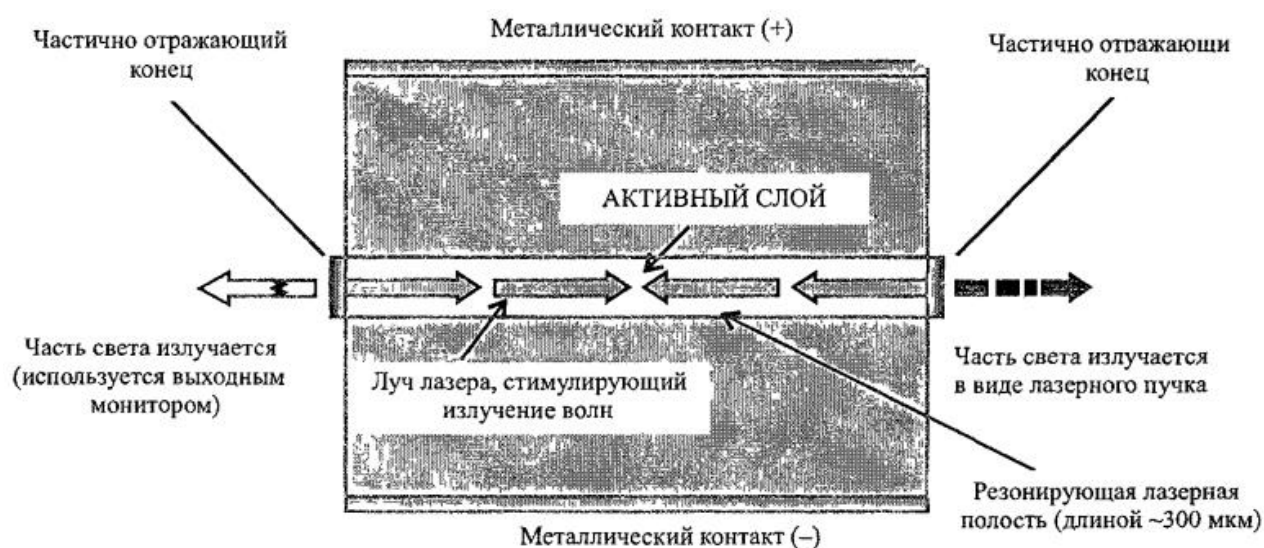


Рисунок 11 – Принцип действия лазерного диода

Рассмотрим физический процесс лазерного излучения. Если к р- и n-области приложить, соответственно, положительный и отрицательный полюсы источника тока, то дырки начинают инжектировать в область р, а электроны – в область n, перемещаясь к активному слою, находящемуся между слоями

материала, имеющего большую ширину запрещенной зоны. В результате по обе стороны активного слоя вблизи поверхности возникнут потенциальные барьеры, и находящиеся в нем почти все дырки и электроны рекомбинируют, излучая свет с длиной волны, практически соответствующей ширине запрещенной зоны. Из-за высокого показателя преломления активного слоя свет, достигая границ активного слоя, отражается от них и не выходит в другие слои структуры. Локализованный таким образом свет проходит взад и вперед от оси резонатора и продолжает свое движение, наращивая силу, до тех пор, пока не сможет прорваться через отражающий конец, и таким образом формируется лазерный пучок. При протекании через структуру полупроводникового лазера электрического тока, вначале, аналогично светоизлучающим диодам, возникает *естественное* излучение, по мощности пропорциональное силе тока, но стоит току возрасти до некоторого порогового значения, мощность излучения резко возрастает, а само излучение становится *лазерным* [8].

Свет, отражаемый от задней поверхности (рисунок 11), может быть использован для управления излучением. Такого рода управление применяется для регулирования силы управляющего тока, чтобы поддерживать постоянный уровень мощности излучения на выходе [9].

ЛД характеризуются следующими параметрами: сроком службы, мощностью излучения и ее зависимость от внешнего тока инжекции, диаграммой направленности излучения Θ и спектром излучения.

Непрерывно работающие лазерные диоды имеют типичный срок службы 10^5 часов (около 11 лет) при комнатной температуре. При больших температурах их показатели ухудшаются и, например, при 70°C составляет около 10^4 часов.

Кривая выходной оптической мощности изображена на рисунке 12. По нему видно, что она имеет два различных наклона. Когда ток ниже порогового значения, ЛД работает как светодиод с низким или отсутствующим выходом (спонтанное излучение). Действие лазера проявляется лишь при превышении

некоторого порогового значения уровня тока I_p , и излучение начинает зависеть преимущественно от вынужденного излучения.

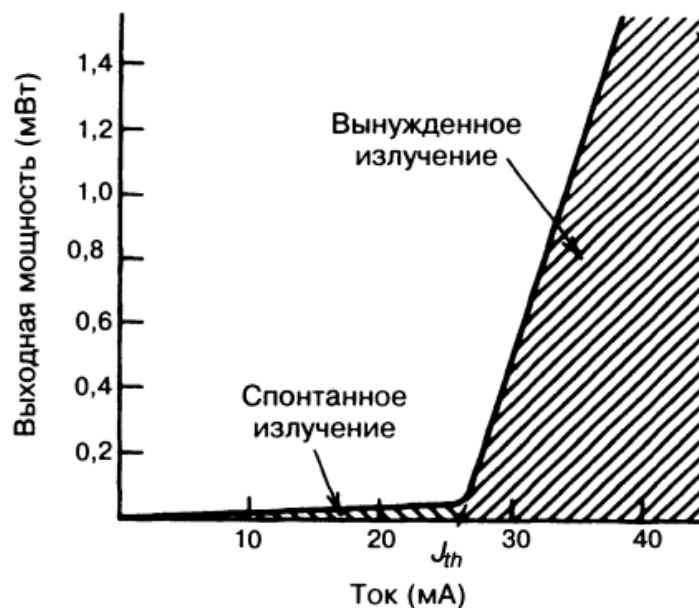


Рисунок 12 – Зависимость выходной мощности лазерного диода от тока возбуждения

На рисунке 13 изображены два графика зависимости мощности излучения от внешнего тока инжекции для ЛД и СИД. По нему видно, что в отличие от характеристики СИДа кривая зависимости ЛДа имеет крутой излом, и в режиме вынужденного излучения при увеличении тока уровень выходного излучения резко возрастает. Пороговый ток обычно находится в диапазоне от 30 до 250 мА, с напряжением смещения от 1,2 до 2 В. Практические устройства работают с током от 20 до 40 мА выше порога и могут генерировать свет, мощностью от 1 до 10 мВт в непрерывном режиме [6].

После выхода света из источника начинается расширение светового пучка. При сопряжении источника излучения с оптоволоком, лишь часть света попадает в волокно. Чем уже световой пучок, тем большая часть света может попасть в волокно. На рисунке 14 представлены типичные угловые диаграммы излучения светодиодов (СД) и лазеров (ЛД). По нему видно, что излученный лазерным диодом свет имеет более узкую направленность: свет излучается в узком диапазоне углов, и пучок света имеет малую поперечную дисперсию (увеличение диаметра пучка по мере распространения от источника).

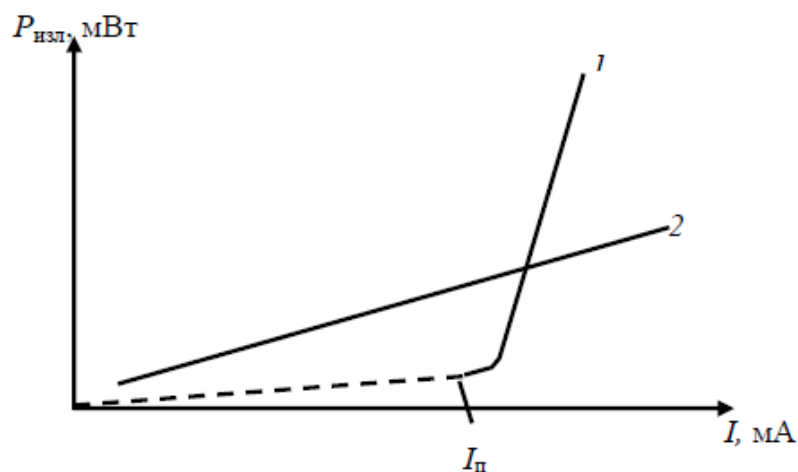


Рисунок 13 – Зависимость выходной мощности от тока возбуждения: 1 – для лазерного диода; 2 – для светодиода

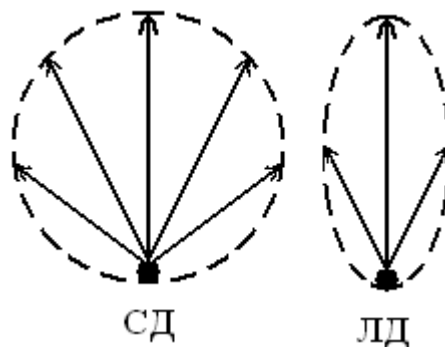


Рисунок 14 – Угловые диаграммы излучения светодиодов (СД) и лазеров (ЛД)

Лазерные диоды имеют типичную ширину спектра около от 1 до 2 нм при рабочей длине излучаемого света 850 нм и от 3 до 4 нм на длинах волн 1300 и 1550 нм (рисунок 15).

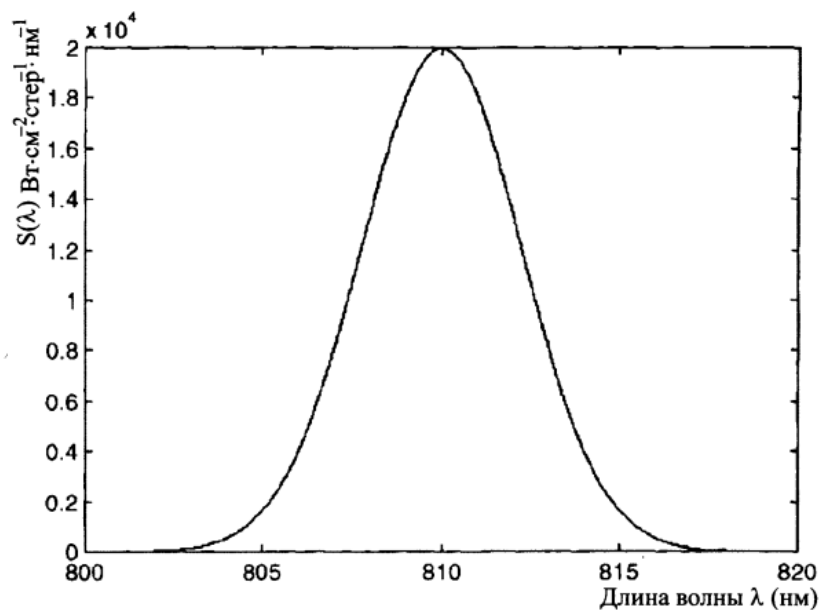


Рисунок 15 – Спектр излучения GaAlAs-инжекционного лазерного диода

На рисунке 16 изображены две спектральные характеристики для светодиода и лазерного диода. По нему видно, что у ЛД ширина спектра значительно уже. Поэтому они значительно менее подвержены проблемам хроматической дисперсии [6].

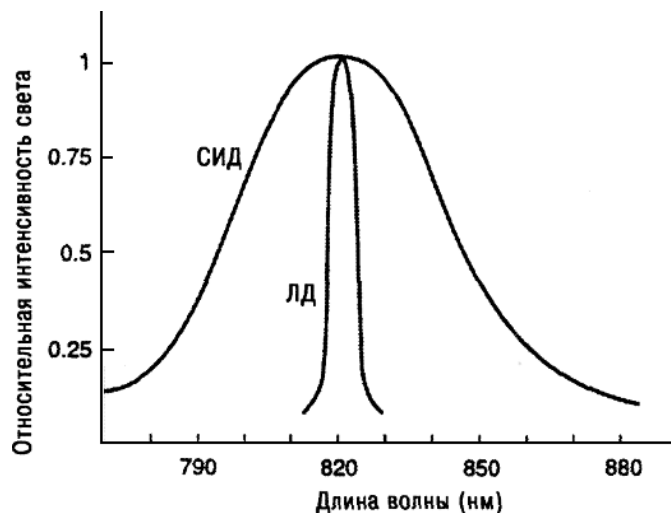


Рисунок 16 – Типичные спектральные характеристики для СИД и ЛД

В таблице 2 для примера приведены параметры некоторых лазерных диодов компании «Нолатех» [10]. Аналогичные устройства выпускаются и другими предприятиями.

Таблица 2 – Параметры ЛД

Типы ЛД	P_0 , мВт	I_p , мА	$I_{раб}$, мА	Длина волны, нм
ЛД- 1064- 10	10	20	50	1064
ЛД- 1064-20	20	20	70	1064
ЛД- 1064-30	30	20	100	1064
ЛД- 1064-40	40	20	130	1064
ЛД- 1064-50	50	20	150	1064
ЛД- 1300-30	30	10	90	1310
ЛД- 1300-40	40	10	150	1310
ЛД- 1300-50	50	20	200	1310
ЛД-1550-5	5	15	50	1550
ЛД- 1550- 10	10	15	70	1550
ЛД- 1550-20	20	15	100	1550

Далее приведены некоторые выводы:

- в СИД свет излучается спонтанно, а в ЛД используется вынужденная генерация света, носящая пороговый характер;
- лазер имеет более узкую спектральную ширину излучения и более узкую направленность по сравнению с СИД;

- одномодовое волокно необходимо использовать только совместно с ЛД;
- СИД дешевле и проще в эксплуатации по сравнению с ЛД;
- СИД – некогерентный источник света, ЛД – когерентный источник света.

2.2 Оптическое волокно

Среда, ограничивающая область распространения оптических колебаний и направляющее поток световой энергии в заданном направлении, соединяющее передающий пункт с приемной в волоконно-оптических системах, называют оптическим световодом. Наиболее важным свойством оптического волокна является его способность переносить излучение на большие расстояния с очень малыми потерями (затуханиями) порядка 0,2 дБ/км на длине волны 1550 нм.

Конструкция оптического волокна (ОВ) показана на рисунке 17 (жила и другие составляющие части). На нем видно, что жила оптоволокну состоит из внутренней сердцевины и окружающей ее оболочки. Любые дополнительные покрытия (оболочки) являются защитными.

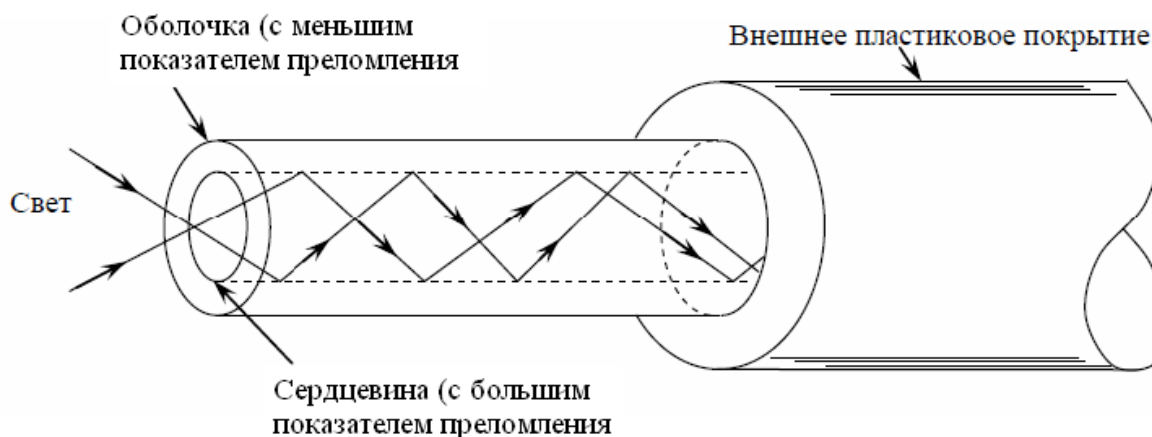


Рисунок 17 – Основная конструкция оптического волокна

Обычно, показатель преломления сердцевины обозначают как n_1 , тогда как показатель преломления оболочки обозначают как n_2 . Когда жила ОВ спроектирована так, что $n_1 > n_2$, то структура: сердцевина-оболочка, ведет себя

как волновод. Кварцевое стекло (SiO_2) является основным материалом, как для сердцевины, так и оболочки. Для подгонки нужных значений показателя преломления используются легирующие примеси, такие как бор или германий [11].

Одним из факторов, влияющих на выбор рабочей частоты (длины волны), является величина затухания в оптоволокне. Затуханием называется потеря оптической энергии по мере движения света по оптоволокну. Оно измеряется в децибелах на километр и изменяется от 300 дБ/км для пластикового волокна до, примерно, 0.21 дБ/км для одномодового волокна.

Затухание зависит от длины волны света. Так как при увеличении длины волны (уменьшении частоты) потери уменьшаются, то в волоконно-оптической связи обычно используют инфракрасные световые волны. На рисунке 18 показаны три основные окна прозрачности, характеризующиеся локальными минимумами затухания света в кварцевом волокне. Они являются рабочими длинами волн для волоконно-оптических систем передачи (ВОСП):

- от 820 до 900 нм;
- от 1280 до 1350 нм;
- от 1528 до 1561 нм.

Причем последнее окно может быть расширено до 1620 нм (эта область обычно называют четвертым окном прозрачности).

Физической основой передачи светового сигнала по световоду (оптоволокну) является явление полного внутреннего отражения (ПВО) света от границы раздела двух сред с различными показателями преломления. Для этого показатель преломления сердцевины n_1 должен быть больше показателя преломления оболочки n_2 (т.е. $n_1 > n_2$).

Явление ПВО при этом наблюдается только для луча, падающего под углом, равным или большим угла ПВО. Его можно вычислить по формуле (35) (закон Снеллиуса) [11].

$$\theta_n = \arcsin(n_2 / n_1). \quad (35)$$

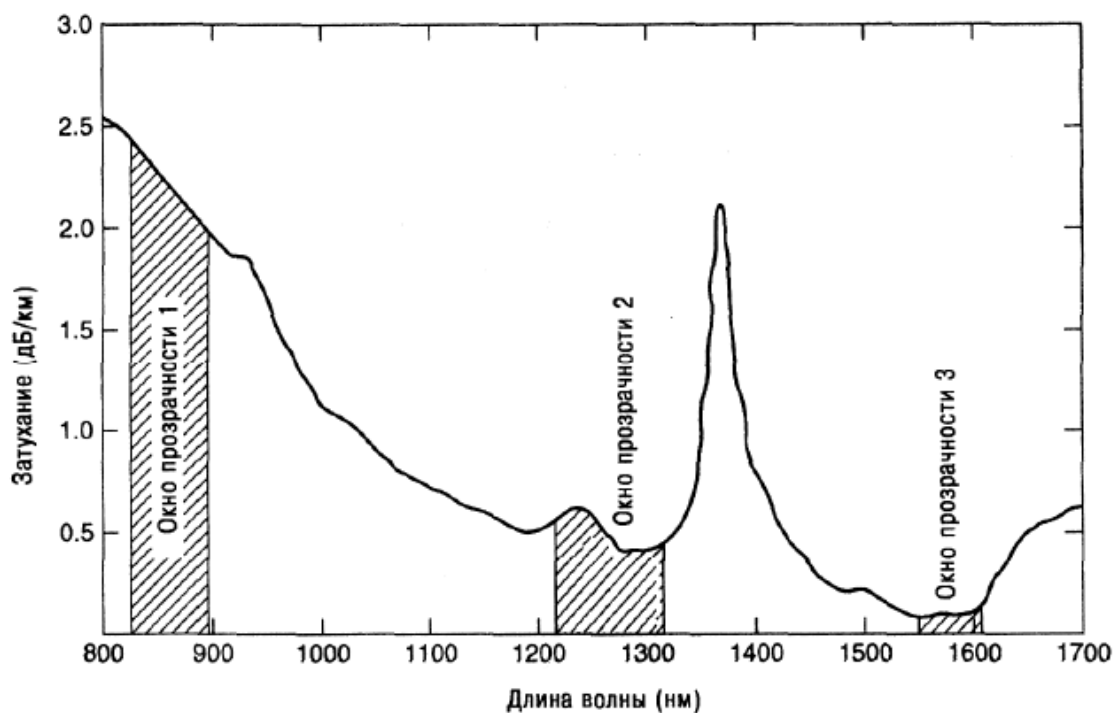


Рисунок 18 – Затухание сигнала в оптическом волокне в зависимости от длины волны (показаны три окна прозрачности, используемые для ВОСП)

Рисунок 19 демонстрирует картину при различных углах падения. Рисунок 19 (а) показывает такой угол падения, при котором преломленный луч полностью уходит в свободное пространство. Рисунок 19 (б) показывает такой угол падения, который называется критическим, когда преломленный луч начинает скользить по границе раздела. Рисунок 19 (в) демонстрирует случай *полного внутреннего отражения* (ПВО). Это происходит тогда, когда угол падения превышает критический. Стеклоанное ОВ, используемое для целей передачи света, требует использования полного внутреннего отражения.

Световой луч вводится в ОВ под каким то углом. Максимальный угол падения луча в сердцевину волокна называется θ_a углом апертуры. Для ПВО луч должен вводиться в волокно под углом апертуры. Синус угла апертуры называется числовой апертурой и обозначается буквами NA (N-number-число, A-aperture-отверстие). Числовая апертура NA определяется по формуле (36).

$$NA = \sin \theta_a = (n_1 - n_2)^{1/2} \quad (36)$$

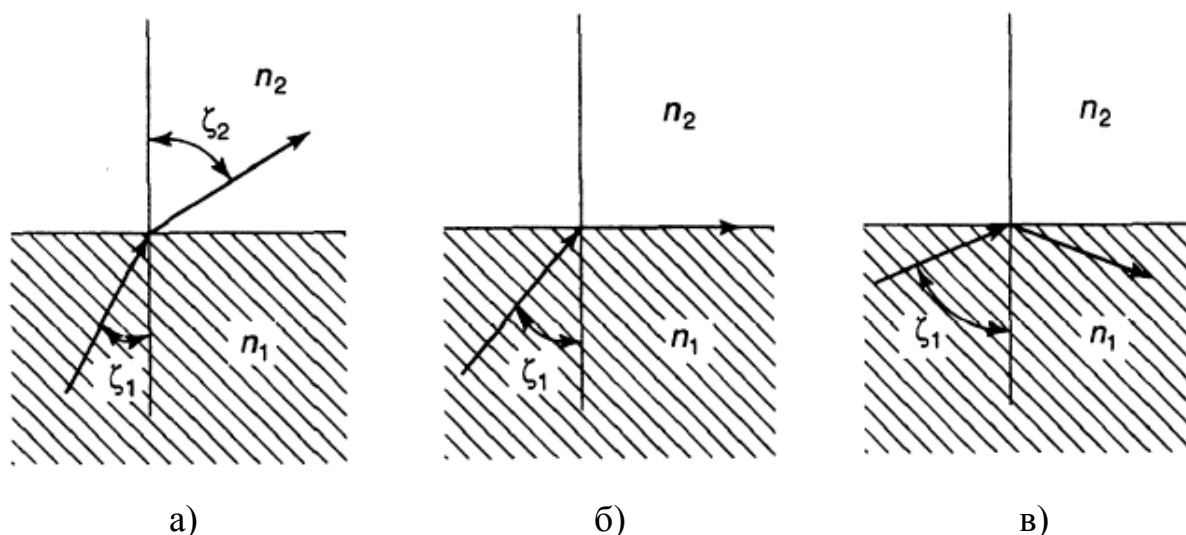


Рисунок 19 – Путь лучей для нескольких углов падения, $n_1 > n_2$, где n_1 и n_2 — показатели преломления двух различных сред [12]

По формуле (36) видно что, числовая апертура ОВ NA зависит только от показателей преломления сердцевины и оболочки (рисунок 20).

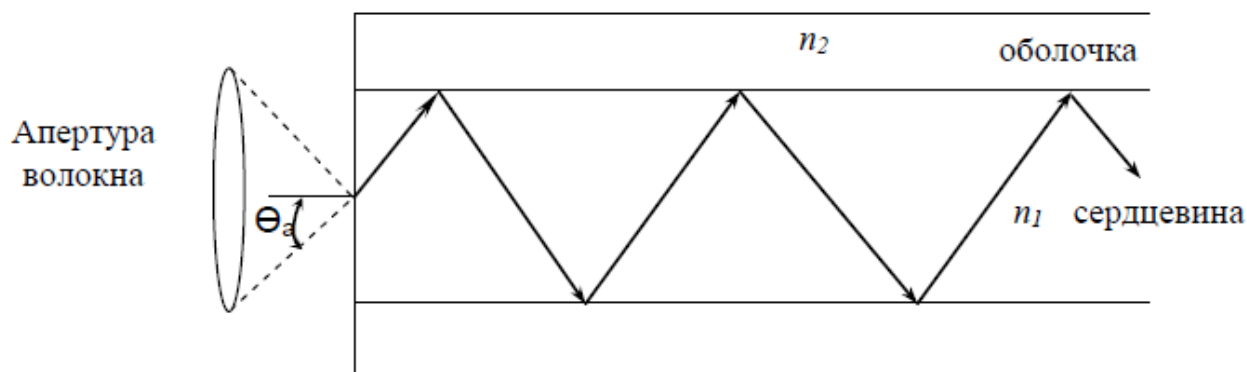


Рисунок 20 – Распространение светового луча по оптическому волокну.

Числовая апертура оптического волокна

По отношению к длине волны в зависимости от диаметра сердцевины ОВ делятся на одномодовые и многомодовые (рисунок 21). Как по нему видно, внешний диаметр как одномодового ОВ, так и многомодового ОВ одинаков и составляет номинально 125 мкм. Однако диаметр сердцевины у одномодового ОВ существенно меньше и составляет порядка 9 мкм. В то время как диаметр сердцевины у многомодового ОВ составляет порядка 50 мкм. Эти значения приведены для справки. В действительности существуют и другие значения диаметров ОВ.

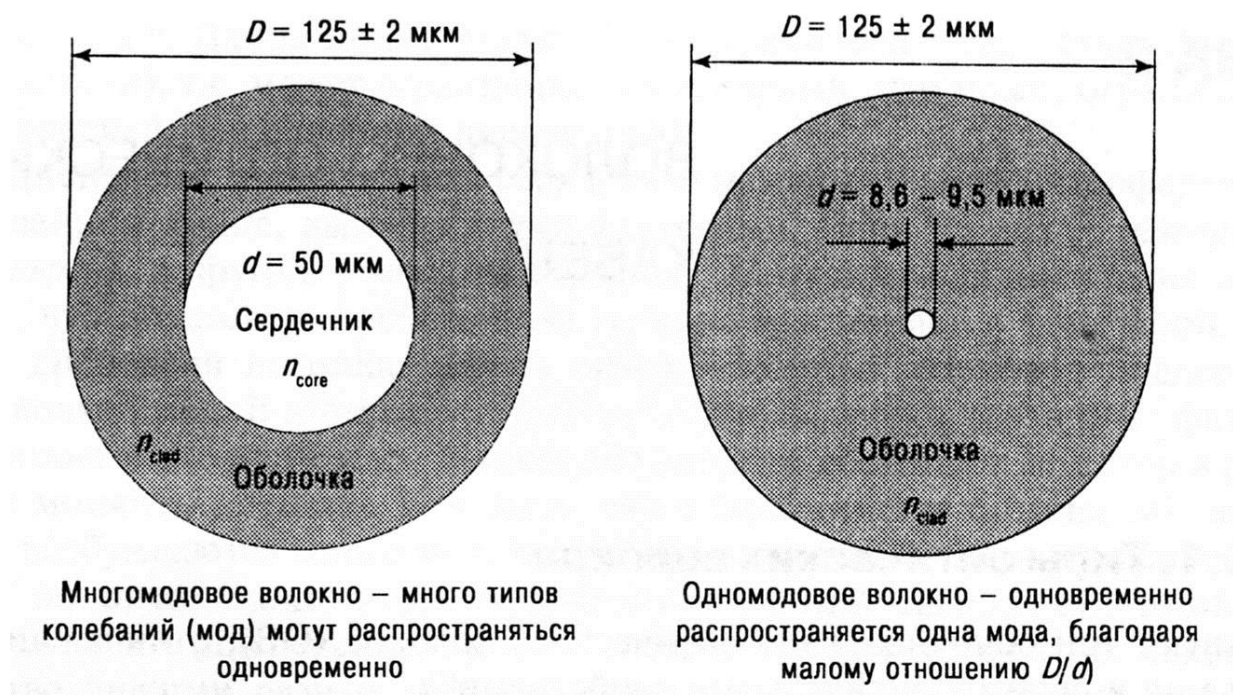


Рисунок 21 – Поперечное сечение многомодового (слева) и одномодового (справа) волокон

Многомодовое ОВ по сравнению с одномодовым, как уже было сказано, имеет больший диаметр сердцевины. Вследствие этого по нему может распространяться множество мод, некоторые из которых могут распространяться на небольшие расстояния и исчезать в процессе распространения. На рисунке 22 показано распространение трех мод по многомодовому оптоволокну. По данному отрезку ОВ видно, что мода самого низкого порядка отражается от оболочки всего два раза, а мода самого высокого порядка отражается гораздо чаще нее (около семи отражений на этом же отрезке ОВ). В результате этого энергия моды самого высокого порядка запаздывает по сравнению с энергией моды самого низкого порядка. Это приводит к уширению первоначального импульса [12].

В отличие от многомодового ОВ одномодовое оптическое волокно проектируется таким образом, что по нему может распространяться только одна мода. Поэтому в нем отсутствует модовая дисперсия. На рисунке 23 показано идеализированное распространение света по одномодовому ОВ.

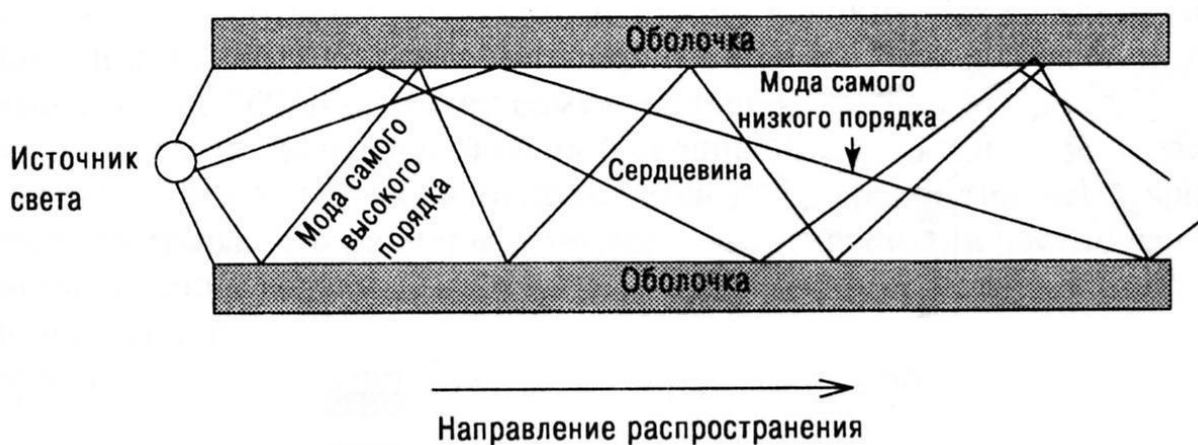


Рисунок 22 – Распространение света по многомодовому ОВ

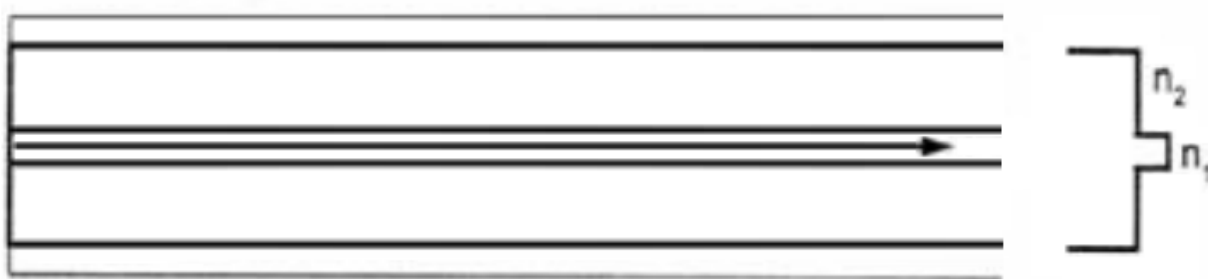


Рисунок 23 – Распространение света по одномодовому ОВ

Сравнительная характеристика одномодового и многомодового оптических волокон изображена в таблице 3 [11].

Таблица 3 – Сравнительная характеристика одномодовых и многомодовых ОВ

Одномодовое ОВ	Многомодовое ОВ
Практически все лучи проходят один и тот же путь, в результате чего все они достигают приемника одновременно, и форма сигнала практически не искажается	Траектории световых лучей имеют заметный разброс, в результате чего форма сигнала на приемном конце кабеля искажается
Одномодовый кабель имеет диаметр центрального волокна около 9 мкм и передает свет с длиной волны около 1,3 мкм	Центральное волокно имеет диаметр 62,5 мкм, а диаметр внешней оболочки – 125 мкм, Длина волны света равна 0,85 мкм.
Для передачи применяются лазерные приемопередатчики, использующие свет исключительно с требуемой длиной волны	Для передачи используется обычный (не лазерный) светодиод
Коэффициент затухания порядка 0,5 дБ/км, отсутствует межмодовая дисперсия	Коэффициент затухания порядка 3 дБ/км
Значение числовой апертуры θ_a порядка 0,11	Значение числовой апертуры θ_a порядка 0,22
Допустимая длина кабеля достигает 100 и более километров	Допустимая длина кабеля достигает 2-5 км.

Анализируя данные, представленные в таблице 3, для целей измерения малых перемещений выбираем одномодовое ОВ, потому что оно имеет малые затухания и искажения сигнала.

2.2.1 Волоконно-оптические разветвители

Волоконно-оптические разветвители (ответвители) относятся к пассивным элементам ВОСП. В соответствии с названием, оптические ответвители выполняют функцию ответвления части энергии светового потока в соответствии с заданным коэффициентом деления [13].

Диапазон длин волн оптического излучения, для которого нормированы параметры оптических разветвителей, называется рабочим диапазоном длин волн.

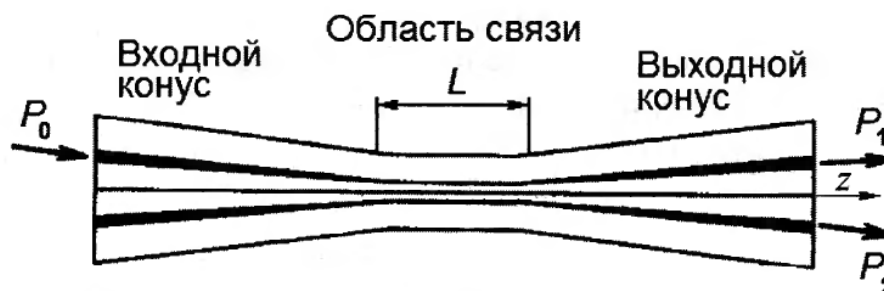
По диапазону рабочих длин волн разветвители можно разделить на:

- однооконные (для передачи оптических сигналов в одном окне прозрачности оптического волокна, например, с центральной длиной волны 1550 нм);
- двухоконные (для передачи оптических сигналов в двух окнах прозрачности оптического волокна, например, 1310 и 1550 нм);
- трехоконные (для передачи оптических сигналов в двух окнах прозрачности оптического волокна, например, 1310, 1490 и 1550 нм);
- многооконные (для передачи оптических сигналов более чем в трех окнах прозрачности).

По технологии изготовления оптические разветвители можно разделить на сплавные (Fused Biconic Taper, FTB) и планарные (Planar Lightwave Circuit, PLC).

Исходя из своего названия, сплавные оптические разветвители изготавливаются методом сплавления оптических волокон. В сплавных разветвителях используется эффект туннелирования: протекания части оптической мощности из сердцевины одного оптического волокна в сердцевину другого через оболочки при их плотном соприкосновении на некотором

«участке взаимосвязи» (рисунок 24). Как видно из рисунка 24, при сплавлении двух волокон образуется два конуса (при вводе и выводе), поэтому сплавные оптические разветвители получили название биконических разветвителей [14].



P_0 – мощность входного оптического излучения; P_1 и P_2 – выходные мощности оптических излучений; L – длина области связи; z – линейная координата вдоль направления распространения излучения в связанных волноводах

Рисунок 24 – Биконический участок сплавного разветвителя

В процессе сварки двух волокон достигается необходимый коэффициент деления мощности (1/99, 3/97, 5/95, 10/90, 20/80 и другие). Главное преимущество разветвителей такого типа является возможность неравномерного деления пропускной способности оптоволокон.

К относительным недостаткам технологии FBT относятся небольшая точность деления мощности и сложность создания несимметричных делителей с большим количеством выходных оптических волокон [14].

Технология производства сплавных разветвителей гораздо проще, чем у планарных, и это отражается в их стоимости. Разветвители, изготовленные по технологии сплавления дешевле, чем планарные. Для изготовления разветвителей методом сплавления используют одномодовые оптические волокна.

Планарные разветвители изготавливаются с использованием методов интегральной оптики. На кремниевой подложке химически осаждаются поочередно слои с материалами сердцевины и оболочки, после чего через маску вытравливается планарный волновод необходимой конфигурации, который также покрывается материалом отражающей оболочки (рисунок 25). Так формируется Y-образный планарный волновод с разветвлением оптической

мощности с конфигурацией оптических полюсов 1х2. Для изготовления разветвителей с большим количеством выходных оптических полюсов необходимо сформировать каскад из простых Y-образных планарных волноводов. В результате получается оптическая микросхема, к которой присоединяются входные и выходные волокна (рисунок 26) [14].

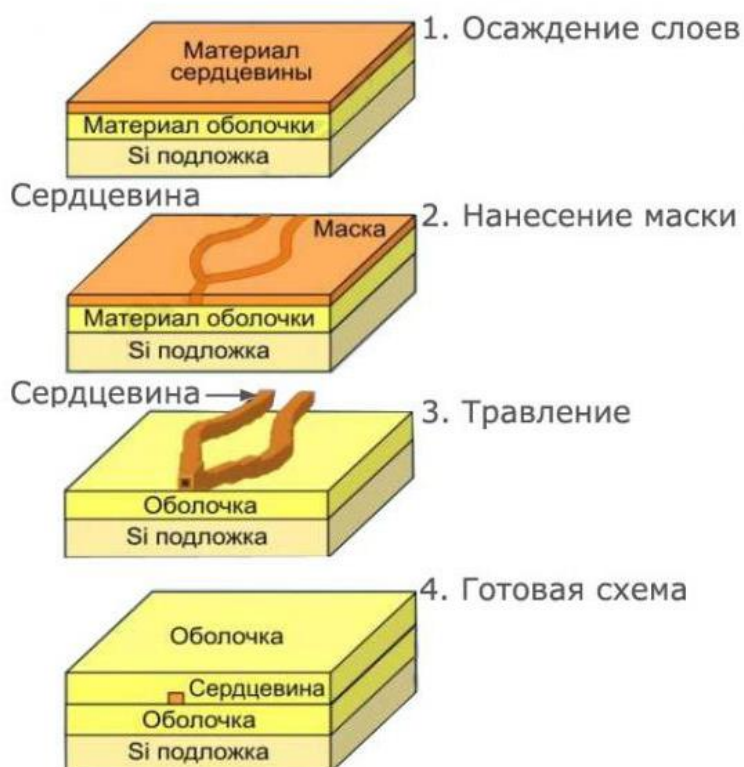


Рисунок 25 – Изготовление PLC разветвителя

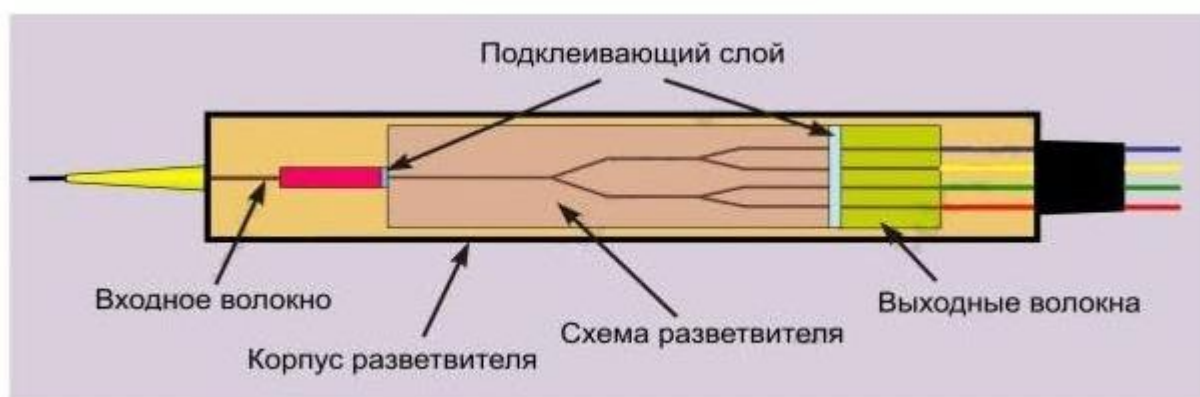


Рисунок 26 – Оптическая микросхема

Планарные разветвители изготавливают по более сложной технологии, чем сплавные, и поэтому их стоимость выше.

При изготовлении планарных разветвителей легче добиться точности деления мощности, показатели затухания в разных экземплярах сплиттеров практически одинаковы и меньше, в отличие от сварных. Однако разветвители данного типа (планарные) менее стойки к воздействию внешних дестабилизирующих факторов. Кроме этого планарные разветвители делят сигнал на равные части, а количество хвостов-выводов чаще всего равно 2^N (2, 4, 8, 16 и так далее), но производятся делители и со свободным числом выходов (3, 6) [15].

Наиболее стойкими к внешним воздействующим факторам является оптические разветвители типа FTV, получаемые путем сплавления оптических волокон. Сравнительная характеристика сплавных и планарных оптических разветвителей приведена в таблице 4.

Таблица 4 – Сравнительная характеристика сплавных и планарных оптических разветвителей

Характеристика	Оптические разветвители	
	Сплавные	Планарные
Технология изготовления	более простая	более сложная
Стоимость	ниже	выше
Механическая прочность	хорошая	удовлетворительная
Точность реализации коэффициента деления	уменьшается с увеличением количеством портов	достаточно высокая
Зависимость вносимых потерь от температуры	малая	удовлетворительная
Деление оптической мощности	возможность неравномерного деления сигнала	делят сигнал только на равные части

2.2.2 Оптические соединители, типы разъемов (коннекторов)

Каким бы длинным ни был отрезок отдельного оптоволокну, никакая система связи не может обойтись без необходимости соединения волокон между собой.

Оптические соединители так же относятся к пассивным элементам ВОСП. Они предназначены для оптического соединения оптических полюсов

других компонентов и обеспечивают передачу оптического излучения между оптическими полюсами [14].

Оптический полюс – это место ввода (для входного оптического полюса) или вывода (для выходного оптического полюса) оптического излучения.

По конструктивному исполнению оптические соединители подразделяют на:

- постоянные (неразъемные);
- полупостоянные, временные (разъемные).

Первые предназначены для однократного соединения, а вторые для многократных соединений оптических полюсов.

Неразъемные соединители могут быть сварными или механическими. При этом сварное соединение предусматривает сращивание концов волокна в постоянное непрерывное соединение с помощью сварки. Механическое же соединение предусматривает сращивание концов волокна в постоянное соединение без помощи сварки (торцы соединяемых оптических волокон помещают или в специальные капилляры, или в прецизионные призмы).

Сварка оптических волокон основана на их точном центрировании, после чего волокна свариваются друг с другом при помощи дугового разряда между электродами. Центрирование волокон осуществляется либо автоматически (применение PAS-системы), либо центрирование в V-образном пазу (V-groove) (рисунок 27).

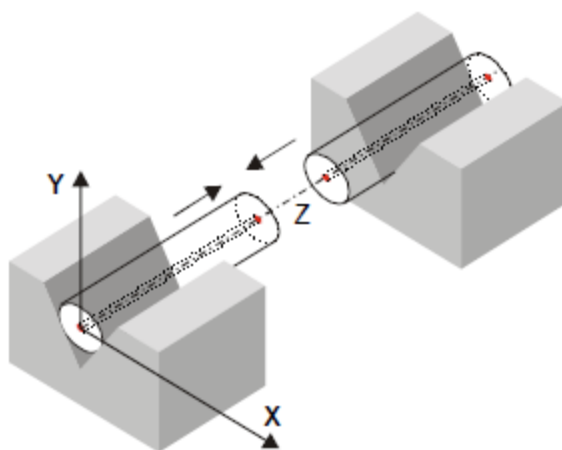
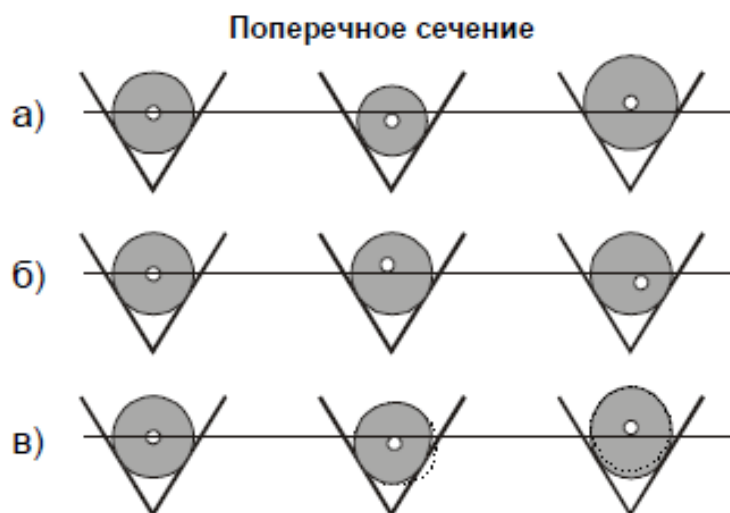


Рисунок 27 – Сварное соединение оптических волокон методом V-groove

Метод центрирования в V-образном пазу хоть и является более простым, он требует достаточно высокого качества геометрии волокна для обеспечения качественного сварного соединения. На рисунке 28 изображены 3 характеристики геометрии оптоволокна, влияющие на качество сварки данным методом [16].



а) различные значения диаметров оболочки волокна; б) при отклонении concentricности сердцевина/оболочка от нормы; в) неоднородности оболочки (утолщения, полости)

Рисунок 28 – Влияние геометрии оптоволокна на качество сварки методом V-groove

Однако если центрирование волокон осуществляется автоматически, то влияние отклонения от идеальной геометрии волокна по трем перечисленным характеристикам практически не ухудшает качество сварки, так как оно контролируется положением сердцевин волокон.

Итак, сварка создает неразрывное соединение и поэтому обеспечивает наилучшие характеристики по вносимым и обратным потерям по сравнению с разъёмным соединением.

Потребность в разъёмных оптических соединителях возникла с появлением оптических волокон, которые были пригодны для передачи информации.

Оптические разъёмные соединения волокон обеспечивают многократные (до 1000 циклов) соединения и разъединения волокон, что особенно важно при создании временного соединения в процессе устранения

неисправностей, а также при подключении измерительных приборов к линии связи. Однако следует учитывать, что при каждом последующем цикле включения-отключения оптические и механические характеристики соединения могут изменяться. Поэтому оптические соединители (розетки) должны быть достаточно надежны и обеспечивать в установленных пределах неизменность параметров соединения при повторном сочленении волокон.

Оптические розетки (или адаптеры оптические) – это устройства, используемые для соединения оптических волокон при построении сетей. Они обеспечивают надёжный контакт и стабильное разъёмное соединение.

Конструкция оптического адаптера зависит от типа используемого коннектора (типа разъема).

Для стыковки частей волокна каждая часть должна быть оконцована соединителем определенного типа.

Оптический разъем – это оптический соединитель, который устанавливается в конце оптического волокна и допускающий многократное соединение волоконных световодов [17].

В настоящее время на рынке существует большое количество оптических разъемов. Далее рассмотрим некоторые из них.

Одни из них это **разъемы типа SC**. Его название получено как аббревиатура от Subscriber Connector. Также среди специалистов иногда используется неофициальные расшифровки данного сокращения, такие как Stick-and-Click или Stab Click – «вставь» (линейным движением вперед) и «защелкни», что достаточно хорошо описывает характерные особенности данного типа оптического разъема.

Корпус данного разъема выполнен из пластмассы, при этом наконечник оптоволокна хорошо защищен за счет его максимально полного охвата. Подключение и отключение разъема осуществляется по принципу push-pull плавным линейным движением, делая этот разъем удобным и простым.

Корпус вилки имеет ключ, который при ее неправильном положении препятствует включению в розетку. Защелка вилки открывается только при

вытягивании за корпус, что увеличивает эксплуатационную надежность создаваемого соединения. Согласно стандартам данный тип разъема должен выдерживать не менее 500 циклов подключений и отключений без ухудшения нормативных характеристик, чему в немалой степени способствует отсутствие проворачиваний наконечников друг относительно друга при включении и отключении.

Большой пластмассовый корпус позволяет применить цветовую маркировку типа разъема. Корпус для одномодовых соединений синего цвета и для многомодовых – черного или бежевого. Как вилка, так и розетка разъема может быть выполнена в одинарном и в двойном (дуплексном) виде. На рисунке 29 изображены вилка и адаптер для разъема типа SC.

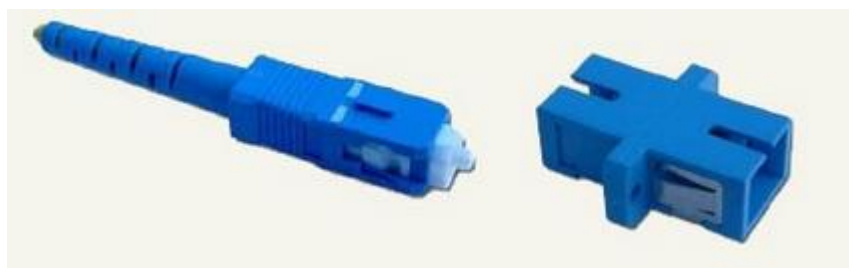


Рисунок 29 – Вилка (слева) и адаптер (справа) для разъема типа SC

Далее рассмотрим **разъемы типа ST**. Название для данного типа разъемов получено как аббревиатура от Single Termination. Также среди специалистов используется неофициальные расшифровки данного сокращения, такие как Stick-and-Twist или Stab-and-Twist – «вставь и поверни».

После установки фиксация вилки в розетке выполняется подпружиненной байонетной гайкой, которая для перевода в закрытое состояние поворачивается на 1/4 оборота по часовой стрелке. Вращение байонетной гайки фиксатора в процессе подключения сопровождается трением наконечников вилок, что ведет к повреждению полировки сердцевины и увеличению вносимых потерь сигнала.

Конструкция разъема ST не обеспечивает возможность формирования двойной вилки, поэтому его розетка в основном выпускается в одиночном варианте.

Корпус вилки и розетки данного типа разъема металлический и выполнены из никелированной латуни, что обеспечивает ему высокую механическую прочность, однако это существенно затрудняет его кодировку и идентификацию.

На рисунке 30 изображены вилка и адаптер для разъема типа ST. На нем видно, что наконечник довольно сильно (на 7,9 мм) выступает из корпуса вилки, что увеличивает вероятность его загрязнения или повреждения.



Рисунок 30 – Вилка (слева) и адаптер (справа) для разъема типа ST

Далее рассмотрим **разъемы типа FC**. Название для данного типа разъемов получено как аббревиатура от Fiber Connector.

Для фиксации вилки на розетку используется круглая накидная гайка M8x0.75, что дает большую герметичность зоны соединения волокон и надежность соединения при воздействии вибраций. Это позволяет использовать данный тип соединителя на подвижных объектах. В то же время применение для фиксации накидной гайки имеет и отрицательные моменты – это необходимость осуществлять несколько оборотов крепежной гайки для подключения или отключения и не позволяет ему иметь дуплексный вариант.

Розетка разъема FC выпускаются в двух основных разновидностях: типа SF с квадратным фланцем и креплением винтами M2 и типа RF (розетка D - типа) с круглым фланцем и креплением под гайку [17].


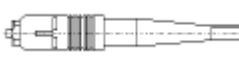

На рисунке 31 изображены вилка и адаптер D-типа для разъема типа FC.



Рисунок 31 – Вилка (слева) и адаптер D-типа (справа) для разъема типа FC

В таблице 5 приведены некоторые характеристики приведенных выше оптических соединителей FC, SC и ST [16].

Таблица 5 – Характеристики оптических соединителей FC, SC и ST

Внешний вид соединителя						
Тип		FC	SC		ST	
Обозначение		FC/ PC	SC MM	SC SM	ST MM	ST SM
Физические характеристики						
Тип соединения		Резьба M8x0.75, ключ	Защелка с фиксатором (дизайн push-pull)		Байонетная фиксация с ключом	
Стыковка		Скругленный торец, физический контакт, плавающий наконечник, конструкция без утягивания кабеля			Скругленный торец, физический контакт, подпружиненный наконечник	
Совместимое волокно		SMF: D/125 мкм	MMF: 50/125; 62,5/125 мкм	SMF: D/125 мкм	MMF: 50/125; 62,5/125 мкм	SMF: D/125 мкм
Оптические характеристики						
Вносимые потери	FLAT	< 1.0 дБ	—	—	—	—
	PC	< 0.5 дБ	< 0.25 дБ	< 0.5 дБ	< 0.7 дБ	< 1.0 дБ
	SPC	< 0.5 дБ	< 0.25 дБ	< 0.5 дБ	—	< 0.7 дБ
	UPC	< 0.5 дБ	—	< 0.5 дБ	—	< 0.7 дБ
	APC	< 0.5 дБ	—	< 0.5 дБ	—	—
Обратные потери	FLAT	< 1.0 дБ	—	—	—	—
	PC	< 1.0 дБ	< -22 дБ	< -27 дБ	—	< -30 дБ
	SPC	< 1.0 дБ	< -36 дБ	< -40 дБ	—	< -40 дБ
	UPC	< 1.0 дБ	—	< -50 дБ	—	< -50 дБ
	APC	< 1.0 дБ	—	< -60 дБ	—	—
Сокращения: SMF – одномодовое волокно, MMF – многомодовое волокно, D – диаметр сердцевины SMF (от 8 до 10 мкм), FLAT – плоский торец, PC –сферический торец, SPC – сферический торец, UPC – сферический торец, APC – угловой сферический торец						

Какого бы типа ни была соединительная розетка, FC, SC, ST или LC, все они применяются с целью создания соединения между оптическими шнурами, оснащенными определенными разъемами (коннекторами).

Не всегда принять решение какой из методов (разъемный или сварной) наиболее подходящий, лучший для конкретной задачи. Необходимо учитывать преимущества и недостатки каждого типа соединения вместе с общими требованиями к системе в целом. В таблице 6 проведены преимущества данных типов соединения.

Таблица 6 – Преимущества разъемного и сварного соединений

Преимущества разъемного соединения	Преимущества сварного соединения
Существует разрыв	Непрерывное соединение
Простое соединение/разъединение частей системы	Меньшие вносимые потери
Легкая реконфигурация системы	Меньшие обратные потери
Предусматривает стандартные типы соединителей	Легче достигается герметичность
Разделение системы без повреждения деталей	Менее дорогое в расчете на одно соединение
Возможность соединения в полевых условиях	Более компактное в расчете на одно соединение

2.2.3 Типы полировки

Разъем контактного типа в общем случае предполагает непосредственную стыковку соединяемых элементов, а не самих волокон. Без применения специальных мер между стыкуемых оптических волокон может образоваться воздушный зазор. Его наличие может привести к возникновению эффекта френелевского отражения и формированию конусообразного пучка излучения. Эти эффекты являются одними из причин увеличения потерь в разъемном соединителе [17].

Шлифовка (полировка) направлена для обеспечения идеально плотного соприкосновения сердцевин ОВ. Однако из-за конечной точности оборудования для механической обработки наконечников полного сближения торцевых поверхностей плоской формы практически невозможно. Как видно из рисунка 32 соединение коннекторов с плоским торцом чревато возникновением воздушной прослойки. Обратное отражение составляет порядка -14 дБ.

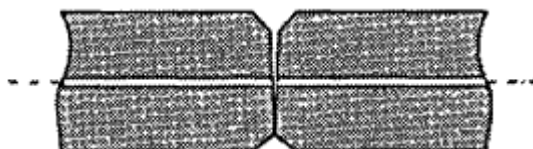


Рисунок 32 – Плоская форма торцевой поверхности ОВ

Для минимизации потерь оптический разъем должен быть реализован по схеме так называемого физического контакта (**physical contact** – PC). Эта схема

основана на принудительном обеспечении плотного прилегания друг к другу сердцевин волокна. Разъем, обработанный методом РС (в том числе вручную), представляет собой скругленный наконечник. При этом расстояние между торцами сердцевин ОВ оказывается намного меньше длины волны передаваемого излучения. Обратное отражение составляет порядка -25 дБ. Поэтому данный тип полировки используется при передачи сигнала на небольшие расстояния и на небольших скоростях.

Так как ручная полировка РС дает не лучшие значения вносимых потерь (типичное значение вносимых потерь для одномодового волокна – 0,2 дБ), то производители продолжали поиск новых методов шлифовки. Так появились виды шлифовки **Super Physical Contact (SPC)** и **Angled Physically Contact (APC)**.

Единственное отличие *SPC* полировки от РС это то, что полировка типа *SPC* производится машинным способом. Поэтому и отличается более высоким качеством. Отражательная способность находится в пределах -40 дБ [18].

Коннектор типа *APC* обработан совсем по другому принципу: торец ОВ скошен и заполирован под углом 8° . При этом обратные отражения практически сразу же покидают ОВ, благодаря чему снижаются потери (рисунок 33). Отражательная способность может составить и -60 дБ, и -65 дБ. Так как отражается меньше одной десятитысячной доли сигнала, то коннекторы APC, как правило, используют для реализации самых требовательных систем [19].

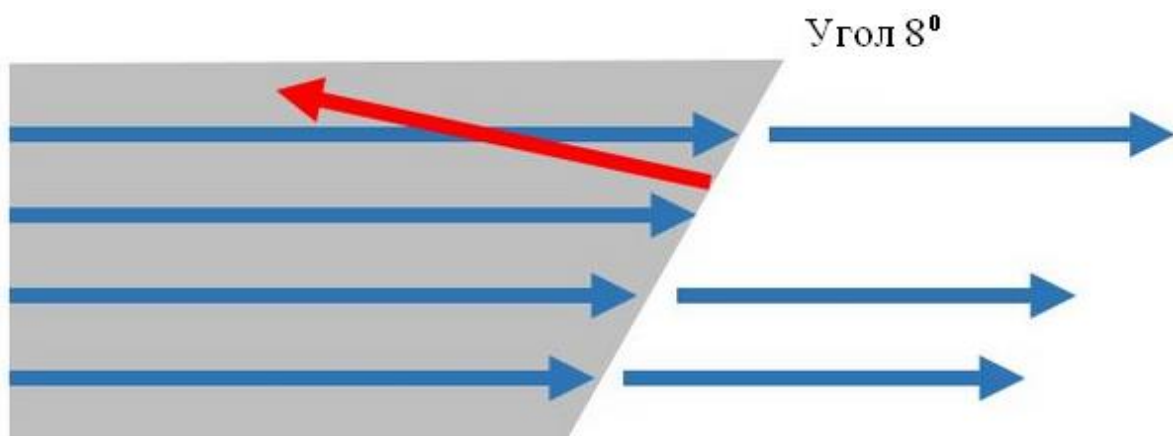


Рисунок 33 – Форма наконечника и путь отраженного сигнала в разьеме с полировкой APC

Последним появился вариант с полировкой типа **Ultra Physical Contact** (UPC). Торец такого волокна почти плоский и производится с применением определенных машинных технологий. Благодаря высокоточной обработке поверхности отражательная способность составляет порядка -50 дБ, что несколько хуже, чем у коннекторов с полировкой APC, но лучше, чем у PC и SPC. На рисунке 34 показана форма наконечника и путь отраженного сигнала в разъеме с полировкой UPC.

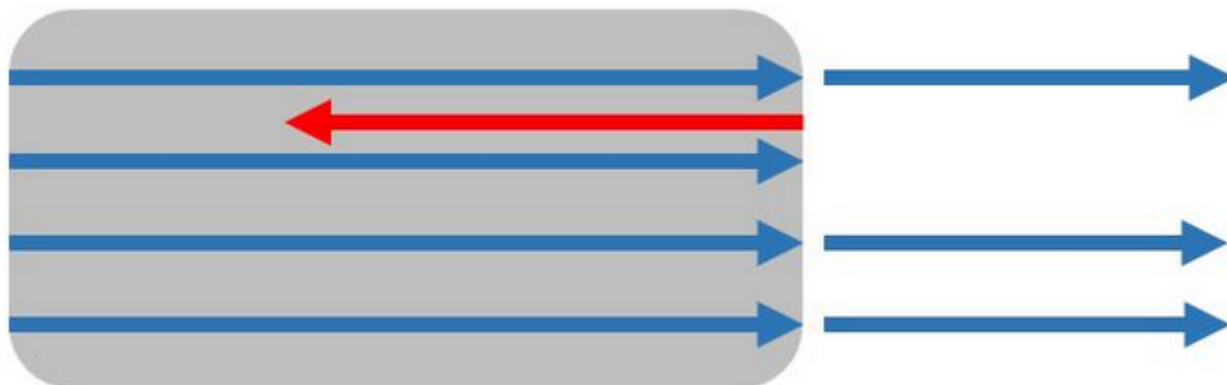


Рисунок 34 – Форма наконечника и путь отраженного сигнала в разъеме с полировкой UPC

При конструировании ВОЛС следует иметь виду, что из-за особенностей строения торца волокна коннекторы типа APC не подходят к разъемам с другой полировкой (PC, SPC, UPC) и вызывают взаимное повреждение. Однако полировки типа PC, SPC, UPC взаимно совместимы.

В таблице 7 приведена сравнительная характеристика вносимых потерь (вносимого затухания) и обратного отражения сигнала для перечисленных выше типов полировки волоконно-оптических коннекторов.

Таблица 7 – Типы полировки

Полировка	Вносимое затухание, дБ	Обратное отражение, дБ
PC	0,2	-25...-30
Super PC	0,2	-35...-40
Ultra PC	0,2	-45...-50
Angled PC	0,3	-60...-65

2.2.4 Потери, ослабление сигнала в оптическом волокне

В процессе распространения по оптоволокну оптический сигнал постепенно теряет свою энергию, то есть затухает. При этом коэффициент

затухания не зависит от интенсивности излучения. Величина данного параметра – один из главных факторов, который определяет максимальное расстояние между приемником и источником излучения.

Существуют четыре причины потерь в оптоволокне:

- собственные внутренние потери;
- потери, вызванные примесями (внешние потери на поглощение);
- рассеяние Рэлея;
- потери из-за несовершенства оптоволокна.

Собственное внутреннее поглощение материала является потерями, вызванными только чистым кремнием. Каждому конкретному материалу присуще собственное фундаментальное светоослабление. Из-за его молекулярной структуры (даже при их идеальной микроструктуре и абсолютном отсутствии примесей) существует поглощение сигнала определенных длин волн. Из всего многообразия силикатных стекол наименьшим фундаментальным ослаблением (суммой светопотерь на поглощение и рассеяние) отличается чистое кварцевое стекло, т.е. состоящее на 100 % из SiO_2 , для которого на длине волны $\lambda=1,55$ мкм оно составляет 0,16 дБ/км. Для двуокиси кремния существуют электронные резонансы в ультрафиолетовой (УФ) области для длин волн $\lambda < 0,4$ мкм. Кроме этого также существуют колебательные резонансы в инфракрасной (ИК) области для длин волн $\lambda > 7$ мкм. Расплавленная двуокись кремния (SiO_2) является материалом оптического волокна и по своей природе аморфна. Поэтому эти резонансы существуют в форме полос поглощения. Производители оптоволокна не могут влиять на эту составляющую поглощения, разве что перейти на другой материал передачи светового сигнала [12].

Наряду с фундаментальными источниками светоослабления в материалах для волоконных световодах имеются светопотери, обусловленные наличием примесей – **внешними потерями поглощения** [20]. В общем случае эти источники светоослабления являются аномальными, несобственными, т. е. в принципе полностью устранимыми. В настоящее время современные

технологии производства уменьшили вклад от этих потерь до низкого уровня. К примесным источникам светоослабления относятся: ионы переходных металлов, гидроксильные ионы ОН, металлические и неметаллические включения (например, железо, медь, никель, магний и хром). В процессе производства удалось снизить содержание примесных металлов до величины меньше одной миллиардной части и тем самым добиться их довольно малого вклада в общие внешние потери на поглощение. В отличие от них, потери за счет наличия гидроксильных ионов ОН вызваны наличием воды в волокне, оставшейся в процессе производства. Эти примеси так же должны быть снижены до минимума, потому что даже такая малая часть, как одна миллионная, способна вызвать потери 50 дБ в районе длине волны $\lambda=1390$ нм.

Одной из трудноустраняемых потерь является **рэлеевское рассеяние**. Оно обусловлено наличием мелкомасштабных (по сравнению с длиной волны излучения) флуктуаций плотности и химического состава вещества, вариациями концентрации молекул. Эти флуктуации возникают из-за несовершенства внутренней структуры волокна (наличие воздушных пузырьков, неоднородностей и трещин), которые возникают в момент стеклования. Результирующие неоднородности вызывают почти изотропное рэлеевское рассеяние, которое обратно пропорционально длине волны в четвертой степени λ^{-4} . Поэтому, чем больше длина волны излучения, тем меньше будет влияние рэлеевского рассеяния на общее затухание сигнала в волокне. Теоретически на длине волны 1550 нм уровень рэлеевских потерь в кварце должен составлять 0,15 дБ/км [21].

Несовершенство оптического волокна – это еще одна из причин потерь в оптоволокне, которые включают потери от микроизгибов и макроизгибов (рисунок 35).

Макроизгибы соотносят с некоторым определенным малым радиусом. Иногда интуитивно предполагают, что если волокно изогнуто, то в пути передачи возникают потери, а это не так. Потери возникают лишь тогда, когда величина изгиба заставляет лучи света падать под углом меньше критического.

Такое может происходить, если луч прямо падает на изгиб под углом меньше критического (рисунок 36) или если луч отражается от изгиба, а затем входит в оболочку под углом меньше критического [22].

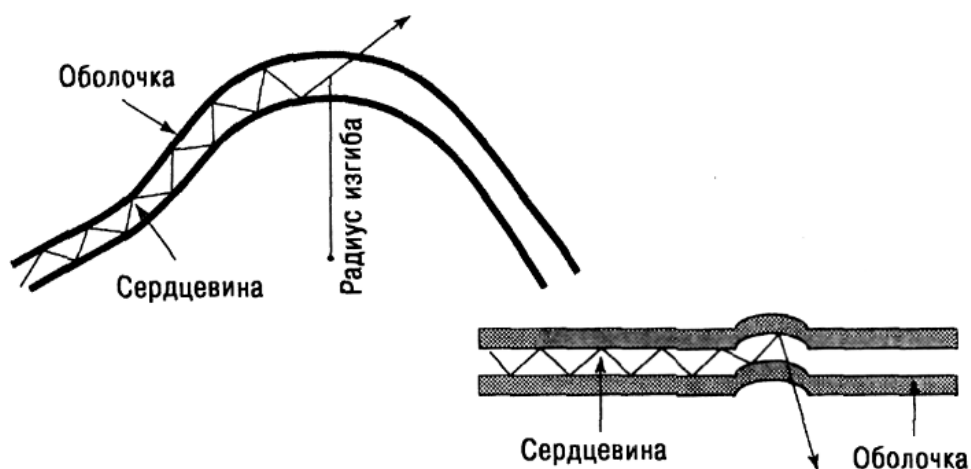


Рисунок 35 – Рисунок, иллюстрирующий макроизгибы (слева) и микроизгибы (справа).

Производитель кабеля в спецификации должен указать норму минимального радиуса изгиба при установке для данного конкретного волоконно-оптического кабеля. Эта величина указывает минимально допустимый внутренний радиус изгиба кабеля после его укладки. Укладчик не должен уменьшать радиус изгиба меньше минимально допустимого, так как это может вызвать существенное увеличение затухания волокна.

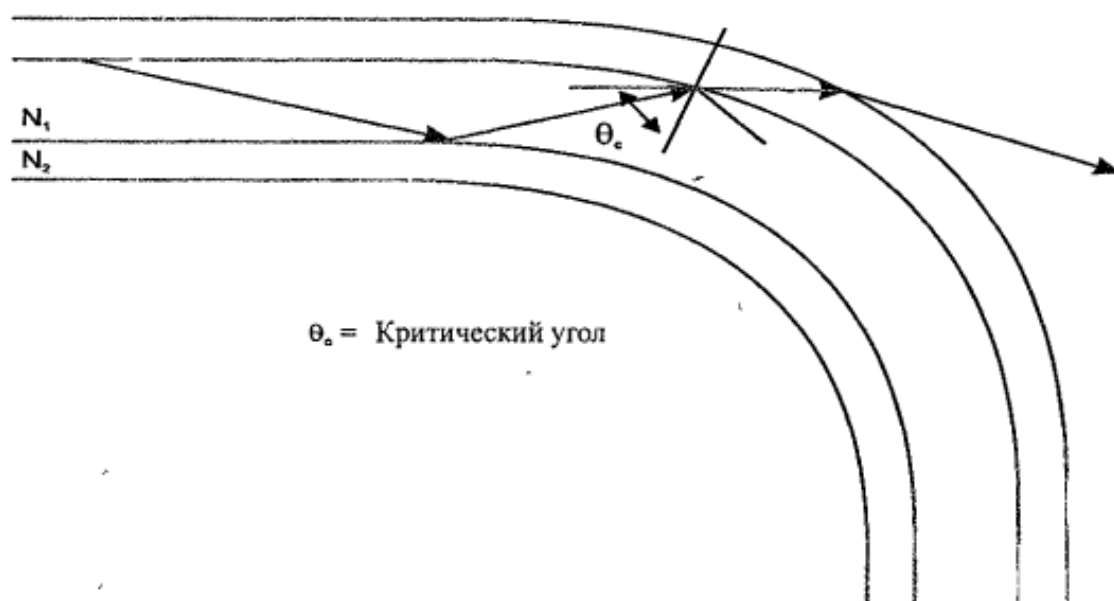


Рисунок 36 – Потери из-за макроизгибов

Второй вид потерь из-за изгибов называют *микроизгибами*. Микроизгиб принимает форму очень маленького резкого изгиба (излома) кабеля. Наличие их непрерывной последовательности может вызвать весьма значительное увеличение потерь в волокне и в некоторых случаях может превышать 100 дБ/км [23]. Микроизгибы могут возникнуть в процессе изготовления оптического волокна, а так же под воздействием внешних сил (тяжелые острые предметы, положенные на кабель, защемление кабеля). Небольшие вариации профиля границы ядро/оптическая оболочка (несовершенство оболочки, волнистость поверхности сердечника/оболочки, крошечные трещины волокна) может привести к возникновению микроизгибов. Как и в случае с макроизгибами, световой луч будет падать под углом меньше критического и проникать в оболочку (рисунок 37).

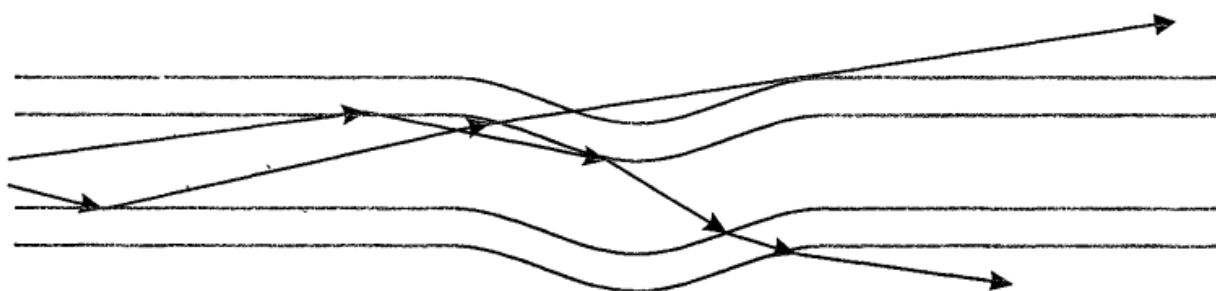


Рисунок 37 – Потери из-за микроизгибов

Все указанные выше причины потери света, который проходит через оптоволокно, могут в различной степени повлиять на энергетический баланс в волоконной системе в зависимости от ее протяженности, способа разветвления кабеля, количества разветвителей, способа укладки кабеля и его возможных заломов и т. д. [21].

2.2.5 Дисперсия

Другой важный параметр оптического волокна, который определяет пропускную способность для передачи информации, – это дисперсия. Пропускная способность волокна зависит от длины волокна. Чем выше протяженность кабеля, тем больше факторов, отрицательно влияющих на передаваемый сигнал (например, хроматическая, межмодовая дисперсии и др.).

В волоконно-оптических системах связи передаваемая по оптоволокну информация часто кодируется в виде последовательных импульсов. По мере распространения по волокну введенный импульс обычно уширяется, поэтому детектируемый на выходе импульс большей длительности и имеет другую форму по сравнению с исходным сигналом.

Таким образом, *дисперсия* – это увеличению длительности светового импульса (расплывание) по мере его движения по оптическому волокну. В технике оптической связи в одномодовых и многомодовых оптических волокнах учитывают различные виды дисперсии. Дисперсия может быть обусловлена следующими четырьмя причинами:

- межмодовая дисперсия;
- дисперсия материала;
- хроматическая дисперсия;
- поляризационная модовая дисперсия.

Ранее был рассмотрен случай распространения света по многомодовому оптоволокну. Там свет представлен многими траекториями лучей, путь каждого из которых был разный. Различные лучи затрачивали неодинаковое время на преодоление пути от одного края волокна к другому. ***Межмодовая дисперсия*** возникает из-за разности групповых скоростей (времен распространения) различных мод в волокне. Данный тип дисперсии присущ многомодовым оптическим волокнам, причем по мере увеличения длины световода дисперсия линейно растет. В реальных световодах линейная зависимость нарушается из-за различных неоднородностей, и дисперсия становится пропорциональной корню квадратному из длины многомодового волокна L (рисунок 38) [17].

Во многих случаях модовая дисперсия не играет значительной роли при конструировании волоконных систем, так как или скорости передачи невысокие, или расстояния не такие большие.

Существует три способа уменьшения межмодовой дисперсии.

Первый метод заключается в применении оптоволокну, сердцевина которого имеет меньший диаметр и поддерживает меньшее количество мод.

Таким образом, сердцевина диаметром 60 мкм поддерживает меньшее число мод, чем сердцевина в 100 мкм;

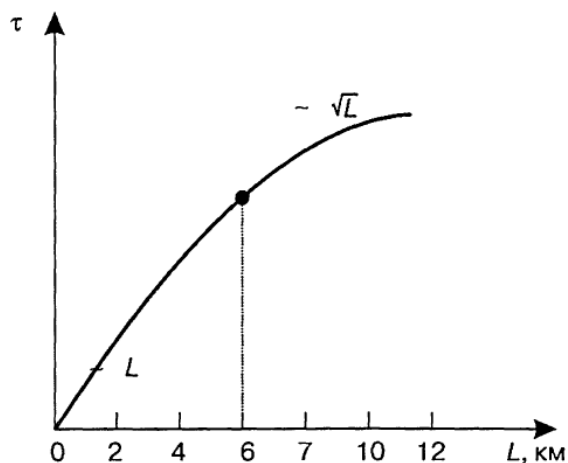


Рисунок 38 – Зависимость межмодовой дисперсии длины многомодового волокна L со ступенчатым профилем показателя преломления

Второй метод заключается в применении волокна со сглаженным импульсом. В данном случае сердцевина волокна состоит из множества концентрических колец, похожих на годовые кольца дерева. При этом по мере удаления от центральной оси сердцевины показатель преломления каждого последующего слоя меньше предыдущего. Так как свет распространяется быстрее в среде с меньшим показателем преломления, то по мере его удаления от центра, его скорость возрастает. Таким образом, световые лучи, прошедшие по более длинным траекториям, достигали противоположного торца волокна в тот же момент времени, что и лучи, движущиеся по коротким траекториям;

Третий метод заключается в применении одномодового волокна, позволяющего избежать модовой дисперсии.

Материальная дисперсия вызвана тем, что различные длин волн также движутся через материалы с различными скоростями [12].

В оптике обычно рассматривают показатель преломления среды n . Он показывает во сколько раз может уменьшиться скорость распространения изучаемой волны v , м/с в веществе по сравнению со скоростью света c , с в вакууме. Применительно к оптоволоконной техники, средой перемещения

исследуемой волны является стекло (SiO_2). Известно, что показатель преломления определяется через формулу (36).

$$n = \frac{c}{v} . \quad (36)$$

Известно, что каждая волна распространяется по веществу с разной скоростью, т. е. значение скорости v для каждой длины волны будет отличной друг от друга. Следовательно, показатель преломления материала, из которого будет сделан световод, изменяется в зависимости от длины волны проходящего через него света (n будет медленно уменьшаться с увеличением длины волны) (рисунок 39). Дисперсия, связанная с данным явлением, называется *материальной дисперсией*, так как зависит от свойств материала волокна.

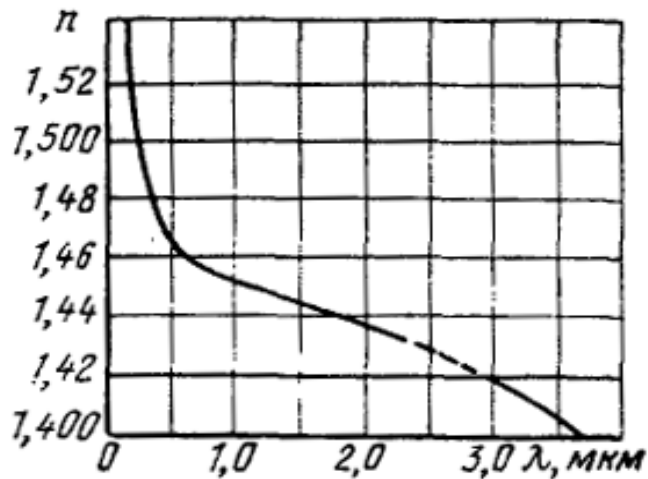


Рисунок 39 – Зависимость изменения показателя преломления кварцевого стекла, из которого сделан световод, от длины волны проходящего через него света

Межмодовая дисперсия – основной источник дисперсии во всех многомодовых волокнах, а материальная дисперсия является основной причиной дисперсионных явлений в системах, построенных на одномодовых волокнах. Для систем, построенных на многомодовых волокнах, вклад материальной дисперсии в полную дисперсию незначителен, и ей можно пренебречь.

Уровень дисперсии зависит от нескольких факторов.

Первый из них – это диапазон длин волн света, вводимых в оптоволокно. Обычно источник света излучает сигнал, содержащий набор различных длин волн. Ни один источник не производит лишь одну частоту (длину волны), а выдает спектр, распределенный вокруг центральной частоты. Диапазон длин волн называется спектральной шириной источника. Светодиоды характеризуется широким спектром длин волн (от 30 до 100 нм), лазеры же имеют более узкий размах спектра, шириной от 0,1 до 1,0 нм. Поэтому, если нам необходимо учитывать влияние дисперсии, то в качестве источника излучения лучше взять лазеры, излучающие свет в узком спектральном диапазоне, а в качестве линии передачи – одномодовое оптоволокно.

Второй фактор – это центральная рабочая длина волны источника. Существует интересное явление о скорости распространения волны внутри вещества. В области 850 нм (область первого окна прозрачности) более длинные волны движутся быстрее, чем более короткие длины волн. Например, волны длиной 860 нм движутся быстрее по кварцевому стеклу, чем волны длиной 820 нм. Однако в области третьего окна прозрачности (1550 нм) ситуация обстоит совсем наоборот: более короткие волны движутся быстрее, по сравнению с более длинными волнами. Например, волны длиной 1540 нм движутся быстрее по кварцевому стеклу, чем волны длиной 1560 нм. Кроме этого, в области второго окна прозрачности (1310 нм) происходит совпадение скоростей распространения более длинных (более красных) и более коротких (более голубых) волн. Эта длина волны называется *длиной волны с нулевой дисперсией*. Для чистого стекла она равна 1276 нм, однако волноводная дисперсия сдвигает ее на 30-40 нм, поэтому полная дисперсия оказывается равной нулю в районе 1310 нм. Эта идея отражена на рисунке 40, где длина линии стрелки отражает скорость распространения волны (чем больше скорость, тем длиннее стрелка).

При производстве одномодовых волокон снижается не только диаметр волокна, но и разница в показателях преломления сердцевины и оболочки. При

этом воздействие межмодовой дисперсии исчезает, но в значительной степени влияет материальная дисперсия.



Рисунок 40 – Относительная скорость распространения света разных длин волн

На рисунке 41 показана зависимость дисперсии вещества одномодового волокна от длины волны излучения. Удельная материальная дисперсия измеряется в пикосекундах на километр длины оптоволокна и на нанометр спектрального диапазона источника излучения, пс/(км*нм). По нему видно, что в области 1310 нм (учитывая длину волны нулевой дисперсии 1276 нм и влияние волноводной дисперсии, величина которой находится в диапазоне от 30 до 40 нм) дисперсия равна нулю. Для волн, имеющих длину меньше 1310 нм, дисперсия отрицательна, т. е. волны отстают и прибывают позднее. Относительно волн, имеющих длину больше 1310 нм, дисперсия положительна, т. е. волны опережают друг друга и прибывают раньше [9].

В процессе развития волоконной техники работа на длинах волн вблизи длины волны нулевой дисперсии была довольно привлекательной. Однако если вспомнить про три окна прозрачности рассмотренных выше, то в третьем окне (от 1528 до 1561 нм) достигается наименьшее затухание сигнала (около 0,20 дБ). Было бы хорошо, если бы область нулевой дисперсии совпадала с областью наименьшего затухания.

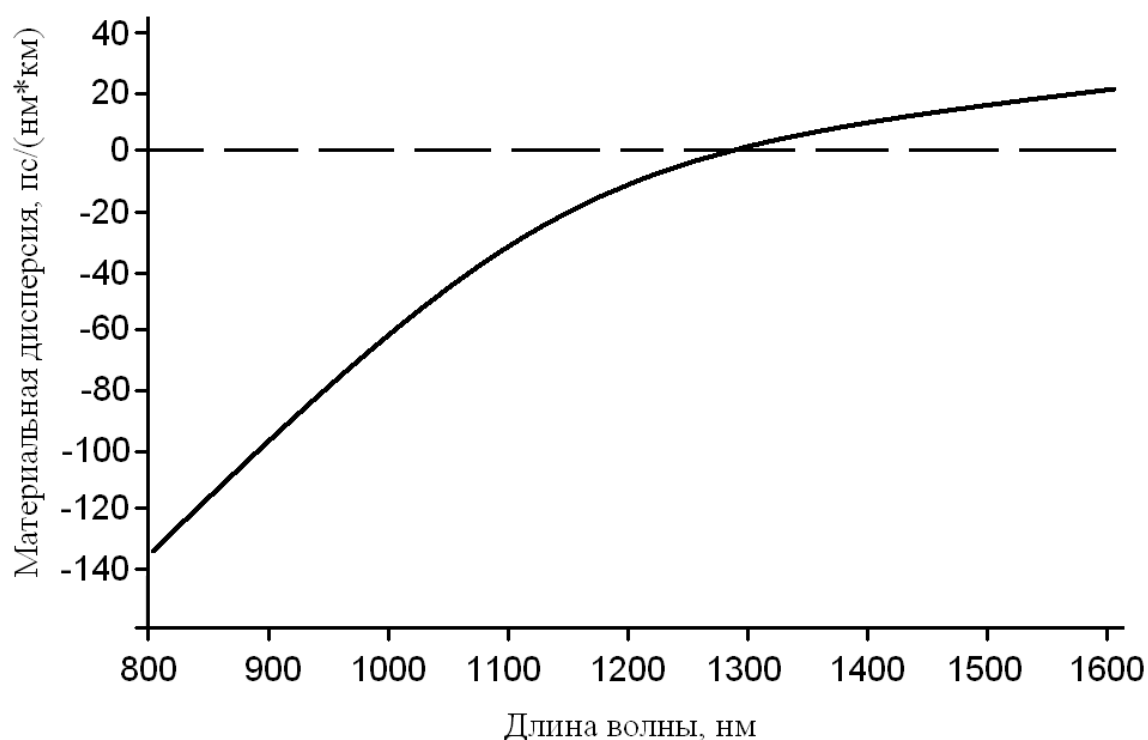


Рисунок 41 – Зависимость материальной дисперсии от длины волны излучения

Хроматическая дисперсия является неким расширением понятия материальной дисперсии. Она состоит из материальной и волноводной составляющих. Как уже говорилось выше, коэффициент преломления стекла n зависит от длины волны проходящего через него света (материальная дисперсия).

Волноводная дисперсия сносит большой вклад в суммарную дисперсию для одномодовых волокон. Она обусловлена тем, что часть световой энергии движется по сердцевине волокна, а часть по оптической оболочке, которые имеют разные показатели преломления. Скорости распространения света по сердцевине и по оболочке из-за различных показателей преломления слегка отличаются. Дисперсия возникает из-за большей скорости прохождения света по оболочке с меньшим показателем преломления, чем по сердечнику с большим показателем преломления. Изменение внутренней структуры волокна позволяет воздействовать на величину волноводной дисперсии, тем самым, изменяя общую дисперсию волокна.

На рисунке 42 представлен схематический график зависимости дисперсии материала, дисперсии волновода и суммарной хроматической

дисперсии от длины волны. Дисперсии материала имеет положительный наклон, а дисперсии волновода – отрицательный наклон кривой изменения дисперсии. В области длины волны 1310 нм эти два вида дисперсии имеют тенденцию компенсировать друг друга.

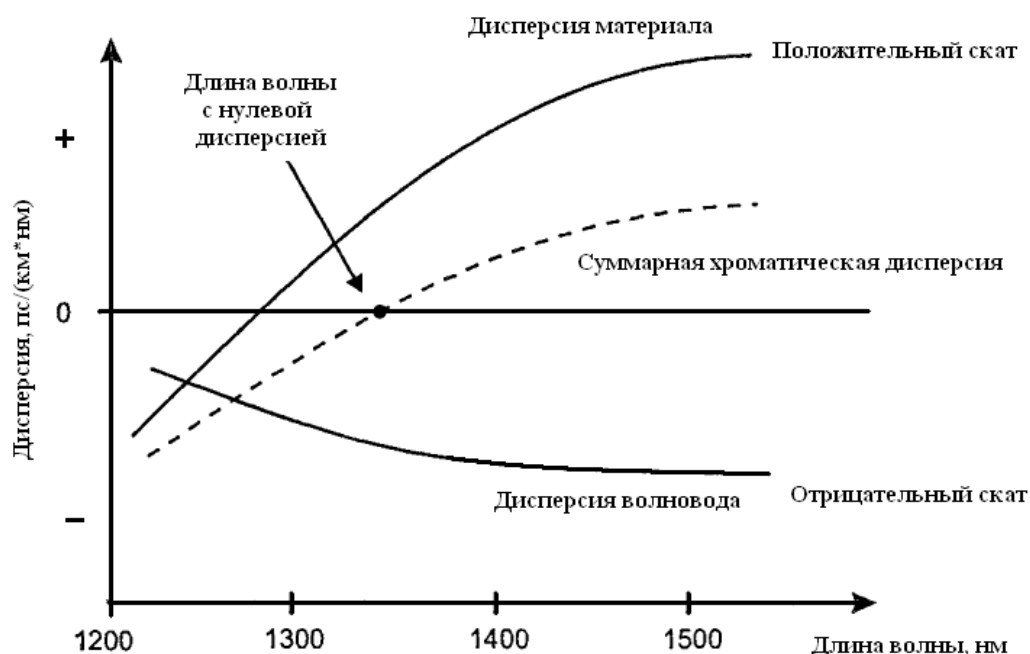


Рисунок 42 – Зависимость дисперсии от длины волны

Как уже было отмечено выше, длина волны с нулевой дисперсией отлична от третьего окна прозрачности оптического волокна, где наблюдаются минимальные затухания. Невозможно изменить влияние материальной дисперсии, так как она зависит от самого материала волокна – стекла. Однако ученым удалось разработать волокно со смещенной дисперсией (Dispersion Shifted), основываясь на том, что волноводная дисперсия образуется за счет прохождения части излучения по оболочке и зависит от радиуса сердцевины и разницы показателей преломления. Поэтому, изменив данные параметры, был получен необходимый сдвиг дисперсии. Однако такие волокна обеспечивают минимальную дисперсию только на одной длине волны, что затрудняет применение мультиплексирования для работы на нескольких оптических несущих в окне прозрачности оптического волокна.

Важно помнить, что хроматическая дисперсия зависит главным образом от длины волны излучения и не зависит от того, является ли кабель одномодовым или многомодовым.

Далее рассмотрим **поляризационную модовую дисперсию (PMD)**. Как мы говорили ранее, в одномодовом волокне протекает лишь одна мода. Однако если учесть поляризацию, то в одном волокне имеется две фундаментальные моды – две ортогональные поляризации вводимого в световод излучения. Одна из мод распространяется вдоль оси x , другая вдоль оси y . В идеальном волокне, в котором отсутствуют неоднородности по геометрии, две моды распространялись бы с одной скоростью (рисунок 43а). Однако на практике оптоволокно имеет неидеальную геометрию. Мелкомасштабные неоднородности показателя преломления среды волновода приводят к различной скорости распространения поляризационных составляющих мод (рисунок 43б) [16].

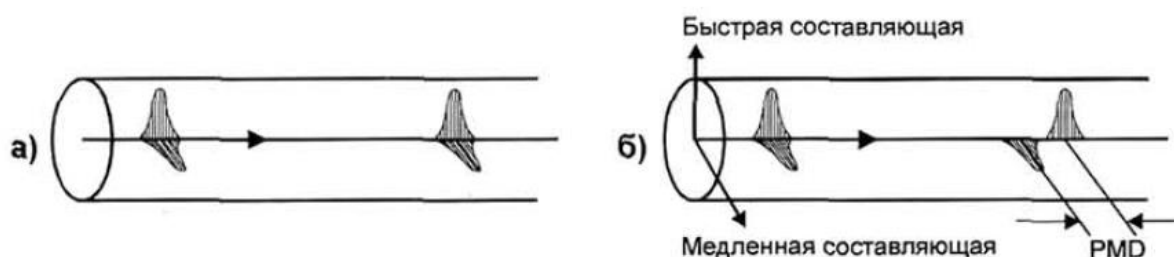


Рисунок 43 – Проявление поляризационной модовой дисперсии

Итак, вследствие различной скорости распространения двух взаимно перпендикулярных поляризационных составляющих моды, возникает дополнительное уширение регистрируемого импульса передаваемого излучения, которое можно обозначить как **поляризационную модовую дисперсию**. В гауссовском приближении данное уширение импульса прямо пропорционально \sqrt{L} , где L – длина волновода, поэтому размерность поляризационной дисперсии обычно равна пс/км^{1/2}.

При создании высокоскоростных (со скоростью передачи информации свыше 1 Гбит/с), протяженных систем связи хроматическая дисперсия становится сравнимой с поляризационной модовой дисперсией.

Главной причиной возникновения данного вида дисперсии является овальность профиля сердцевины одномодового волокна, возникающая в процессе изготовления или эксплуатации волокна. Сердцевина волокна, как и ее оболочка формируются в процессе механического вытягивания, вызывающего непредсказуемое двойное лучепреломление в волокне. Кроме этого помещение волокна в кабель и окончательное размещение его на объекте может привести к возникновению деформации волокна, вызывающего нарушение округлости волокна, удлинению волокна и его изгибу.

Только строгий контроль на производстве оптоволокна позволяет достичь низких значений *поляризационной модовой дисперсии (PMD)*.

2.3 Приемники оптического излучения

Фотоприемник является одним из важнейших и неотъемлемых элементов, с помощью которого осуществляется фотоэлектрическое преобразование, т.е. преобразование оптического сигнала принимаемого с волокна в электрический, используя обратный по сравнению со светодиодами физический процесс. Предназначенный для этих целей фотоприемник, должен точно воспроизводить форму оптического сигнала, не внося дополнительные шумы, т.е. обладать требуемым динамическим диапазоном и чувствительностью, иметь небольшие, но достаточные для надежного соединения с оптическим волокном размеры, должен быть нечувствительный к изменениям параметров внешней среды, иметь большой срок службы и минимальную стоимость [11].

В качестве фотоприемников могут быть использованы фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фотоумножители и другие элементы. В волоконно-оптических датчиках чаще всего используются два вида фотодиодов: PIN-типа и лавинный, которые были разработаны с учетом недостатков рп-фотодиода. Они малого размера и достаточно хорошо стыкуются с волоконными световодами и электронными схемами.

2.3.1 PN-фотодиод

В общем случае фотодиод представляет собой полупроводниковый pn-переход. При отсутствии внешнего электрического поля, в области pn-перехода (между двумя типами полупроводников) существует сильное внутреннее электрическое поле напряженностью E_0 , которое препятствует движению носителей (электронов и «дырок»). Допустим, что излучение воздействует в направлении области n, перпендикулярно плоскости pn-перехода (рисунок 44), при этом образуются новые носители заряда – электроны и дырки. Они разделяются встроенным полем этого перехода, причем дырки перемещаются в p-область (обратный ток неосновных носителей), а электроны, для которых переходная область pn-перехода будет запирающей, остаются в n-области [24].

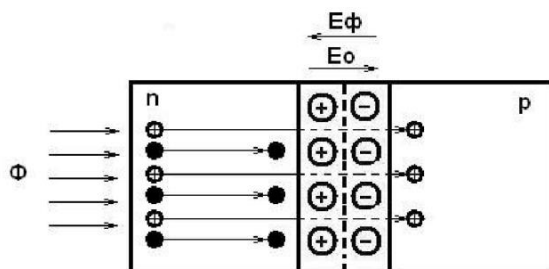


Рисунок 44 – Схема генерирования и разделения пар носителей заряда при освещении pn-перехода

При постоянном освещении в p-области накапливаются дырки, а в n-области – электроны. Это приводит к возникновению фото-ЭДС E_ϕ , поле которой направлено против поля диффузии в pn-переходе. Фото-ЭДС снижает потенциальный барьер pn-перехода до значения $(E_0 - E_\phi)$, тем самым, понижая одностороннюю проводимость pn-перехода. Это приводит к возникновению паразитной диффузной составляющей тока I_{pn} (прямого тока основных носителей) через переход навстречу фототоку I_ϕ . Для обеспечения высокой чувствительности к излучению необходимо, чтобы в фотодиоде I_{pn} был минимальным. Поэтому фотодиод включают в электрическую цепь двумя способами: либо без внешнего напряжения (*фотовольтаический* или *фотогальванический* режим) либо при обратном внешнем напряжении (*фотодиодный* или *фоторезисторный* режим) [25].

Первый способ включения фотодиода – *фотовольтаический* (*фотогальванический*) режим. Он характеризуется отсутствием источника внешнего напряжения в цепи фотодиода (рисунок 45), то есть фотодиод выступает в роли генератора фото-ЭДС. При этом R – это сопротивление нагрузки, U_a – напряжение на диоде.

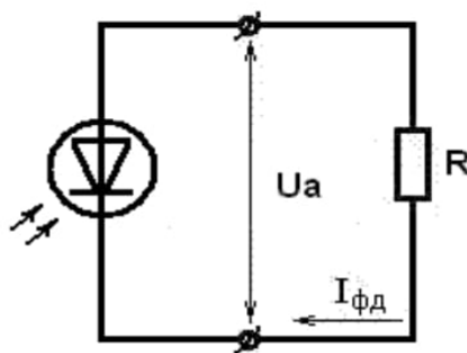


Рисунок 45 – Фотогальванический режим фотодиода

При разомкнутой внешней цепи и неизменном освещении прямой ток увеличивается до тех пор, пока токи основных и неосновных носителей не уравниваются $I_\phi = I_{pn}$, при этом между электродами рп-перехода устанавливается некоторая разность потенциалов холостого хода U_{xx} , возникающая под действием освещения и равно фото-ЭДС [24].

При подключении к контактам фотодиода нагрузки (рисунок 45) и отсутствии освещения, через рп-переход и нагрузочное сопротивление потечет ток термически генерированных неосновных носителей I_s , который называется темновым. Освещение вызывает дополнительный фототок I_ϕ , мА неосновных носителей, которое рассчитывается по формуле (37).

$$I_\phi = S_I \cdot \Phi, \quad (37)$$

где S_I – токовая интегральная чувствительность фотодиода, мА/лм,

Φ – падающий поток излучения, лм.

Общий ток в цепи фотодиода $I_{\phi\partial}$, мА в фотогальваническом режиме рассчитывается по формуле (38).

$$I_{\phi\partial} = I_s \cdot \left(\exp \frac{eU_a}{kT} - 1 \right) - I_\phi \quad (38)$$

где $U_a = I_{\phi\partial} \cdot R$ – падение напряжения на нагрузке от протекающего в цепи тока, В;

e – заряд электрона, Кл;

k – постоянная Больцмана, Дж/К;

T – абсолютная температура, К.

Это выражение позволяет построить вольтамперные характеристики фотогоальванического режима.

В *фотодиодном* режиме рп-переход включен в электрическую цепь и на него подано обратное напряжение $E_{обр}$ (рисунок 46). В данном случае в области перехода возникает обедненный слой, в котором действует значительное электрическое поле, а носители заряда отсутствуют. При отсутствии освещения через рп-переход и нагрузку потечет обратный дырочный ток термически генерированных неосновных носителей I_s , который называется темновым. При освещении фотодиода возникшие в этой области носители заряда разделяются и ускоряются электрическим полем таким образом, что электроны движутся в п-область, а дырки – в р-область. В результате этого создается ток I_ϕ , протекающий во внешней цепи рп-структуры. Суммарный ток в электрической цепи складывается из темнового тока и фототока неосновных носителей и рассчитывается по формуле (39).

$$I_{\phi\partial} = I_s + I_\phi. \quad (39)$$

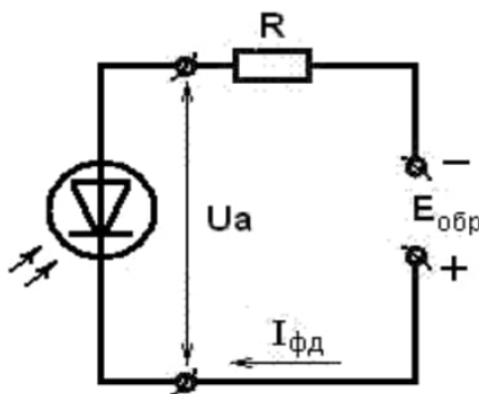


Рисунок 46 – Фотодиодный режим фотодиода

В этом режиме диффузный ток через рп-переход (ток основных носителей) I_{pn} будет пренебрежимо малым, так как прикладываемое обратное

напряжение источника питания, складываясь с напряжением поля диффузии перехода E_0 , препятствует его образованию.

Выражение для вольтамперной характеристики фотодиодного режима определяется формулой (40).

$$I_{\phi\partial} = I_s \cdot \left(\exp \frac{e(U_a - E_{обp})}{kT} - 1 \right) - I_{\phi}. \quad (40)$$

где $U_a = E_{обp} - I_{\phi\partial} \cdot R$ – падение напряжения на фотодиоде, В.

На рисунке 47 изображена типичная вольтамперная характеристика фотодиода.

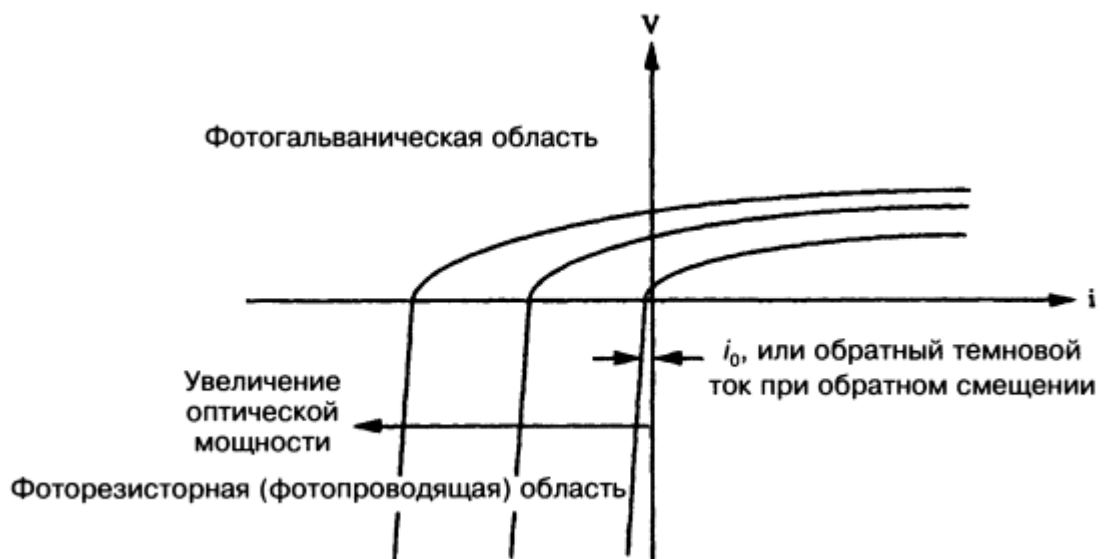


Рисунок 47 – Типичная вольтамперная характеристика фотодиода

Из-за диффузного движения носителей вне обедненного слоя обычные германиевые и кремниевые фотодиоды характеризуются спадом частотной характеристики уже при нескольких десятках килогерц. Снизить влияние диффузного движения носителей и, следовательно, улучшить характеристики фотодиода можно, увеличив толщину обедненного слоя и напряжение смещения, но в таком случае снижается напряженность электрического поля. Для устранения этого недостатка создана PIN-структура фотодиода [8].

2.3.2 PIN-фотодиоды

Диоды на pn-переходе, как правило, не применяются в волоконно-оптических датчиках излучения из-за их недостатков. Структура PIN-фотодиода спроектирована таким образом, чтобы их избежать. Название данного типа диодов (PIN) происходит из сокращения названий составляющих его слоев: p – positive (положительный), i – intrinsic (внутренний), n – negative (отрицательный) [9].

PIN-фотодиод – это диод с тремя областями проводимости, в которых есть дополнительный внутренний слой *i*, сделанный из материала с высоким удельным сопротивлением. Слаболегированный (обедненный) слой *i* сделан максимально широким и разделяет более сильно легированные области p- и n-типа. При этом промежуточный слой легирован таким образом, чтобы не относиться ни к полупроводникам n-типа с электронным видом проводимости, ни полупроводникам p-типа с дырочной проводимостью.

Структура диода показана на рисунке 48, при этом на диод подается обратное напряжение смещения (от 5 до 10 В), которое помогает удерживать носители заряда от внутренней области. Так как внутренний слой не содержит свободных носителей заряда, то он имеет высокое сопротивление. Это приводит к падению большей части напряжения на этот слой, и результирующее электрическое поле повышает скорость ответа и снижает шум.

Сильного различия в работе PIN-диода и pn-диода нет. Благодаря широкому внутреннему слою, падающий на фотодиод свет поглотится с большей эффективностью внутри обедненной зоны. При попадании луча света с необходимой энергией на обедненную область, создается пара носителей заряда электрон-дырка. Напряжение смещения заставляет эти носители заряда быстро смещаться к соответственно p- и n- областям. При этом создается ток, пропорциональный падающему свету, как показано на рисунке 48.

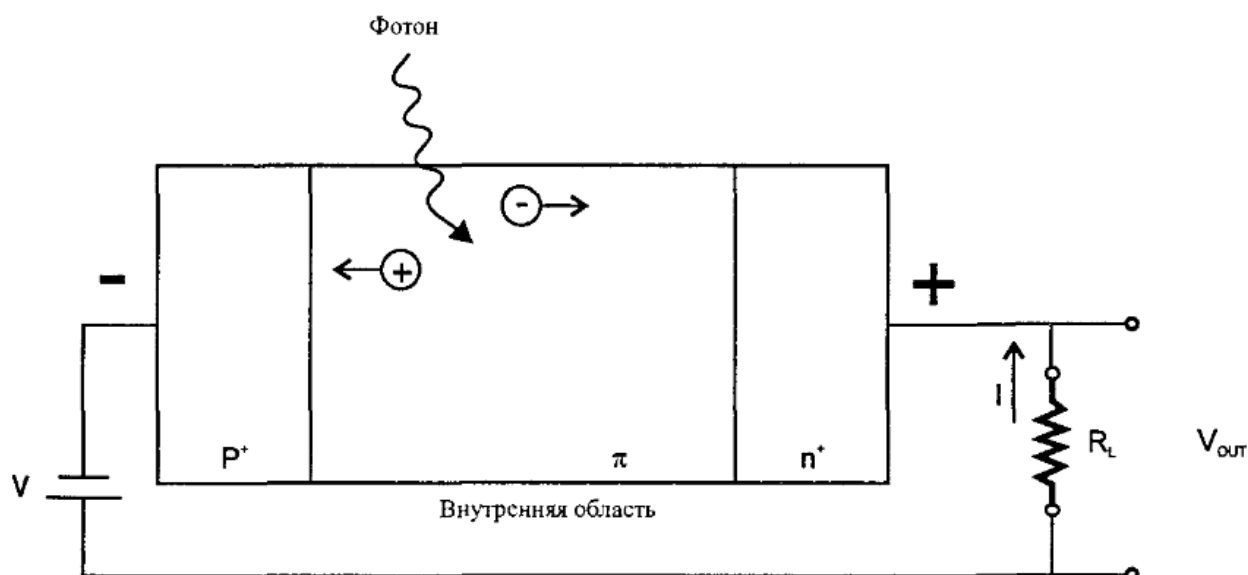


Рисунок 48 – PIN-фотодиод

Существует некоторый оптимальный размер промежуточного слоя i . Для более эффективного протекания процесса преобразования света в электрическую энергию необходимо, чтобы внутренний слой был как можно шире. Но следует учесть, что увеличение ширины внутреннего слоя приведет к увеличению времени смещения носителей зарядов к краям обедненной зоны и, как следствие, уменьшению скорости срабатывания диода. В устройстве PIN-фотодиода учитывается баланс этих двух факторов для достижения большей эффективности поглощения фотонов с максимальной скоростью смещения носителей зарядов.

2.3.3 Лавинные фотодиоды (ЛФД)

В PIN-фотодиодах в лучшем случае каждый поглощенный фотон приводит к образованию одной пары электрон-дырка, которая в свою очередь приводит к образованию тока в виде смещения одного электрона во внешнем контуре электрической цепи. В лавинном фотодиоде несколько падающих фотонов приводят к появлению большого числа носителей заряда и к существенному току во внешней цепи.

Если к pn-переходу приложить высокое обратное напряжение (от 50 до 300 В), то благодаря сильному электрическому полю образующиеся при освещении носители будут ускоряться, достигая высоких энергий. Их

кинетическая энергия настолько высока, что при столкновении быстрых зарядов (носителей) с нейтральными атомами в кристаллической решетке, происходит передача части этой энергии электронам валентной зоны и перемещение этих электронов в зону проводимости. В результате появляются свободные электроны и дырки, которые называются *вторичными носителями*. При этом первоначальные носители сохраняют достаточно энергии, чтобы оставаться в зоне проводимости. В свою очередь, эти вторичные заряды, ускоряясь и соударяясь с другими атомами, создают дополнительные пары электронов и дырок. Таким образом, поглощение фотона порождает не одну электронно-дырочную пару, а десятки и сотни. А генерируемый одним фотоном ток «лавинообразно» приумножается – отсюда и его название [21]. Данный процесс создания вторичных носителей заряда называется *ударной ионизацией*.

На рисунке 49 приведен график зависимости коэффициента усиления тока в ЛФД от напряжения обратного смещения. При низких напряжениях лавинные фотодиоды работают подобно фотодиоду PIN-типа без усиления.

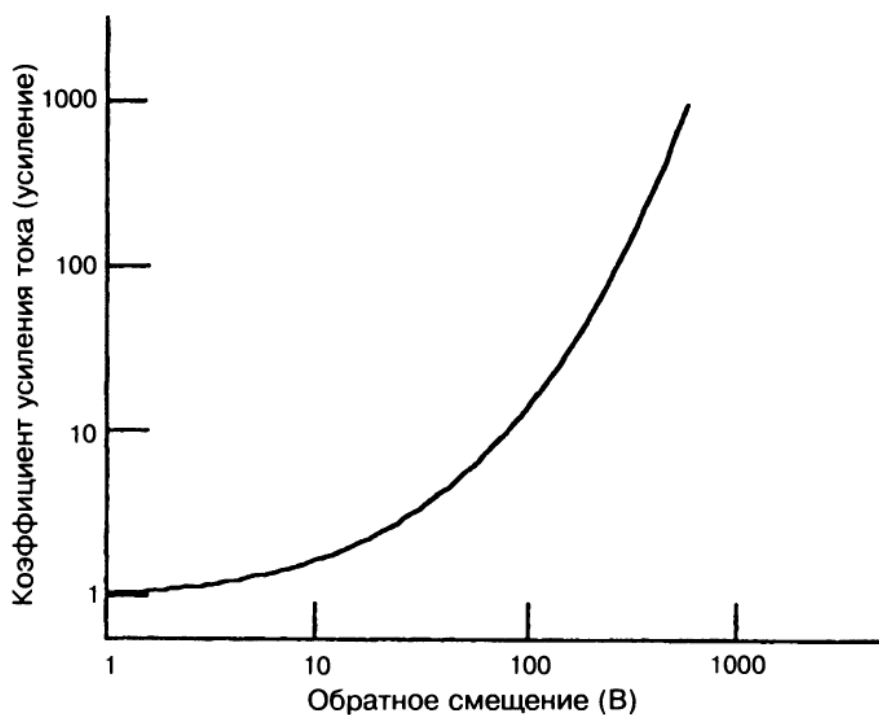


Рисунок 49 – Типичная зависимость коэффициента усиления тока в ЛФД от напряжения обратного смещения

Существует пороговое значение подаваемого напряжения смещения для инициирования лавинного процесса ударной ионизации, при превышении которого ЛФД будет генерировать ток без наличия оптической мощности. Иногда предложенное напряжение принимают чуть меньше порогового значения. При этом даже незначительно освещение будет зафиксировано и приведет к заметному выходному сигналу. Но следует учесть, что при регистрировании очень слабого оптического сигнала, ЛФД хоть и воспроизведет ответный электрический сигнал, но он может быть искаженным и отличаться от действительности. Потому что при этом усиливается не только слабый сигнал, но и помехи, ограничивающие чувствительность фотодетектора. Слишком малый сигнал невозможно отличить от шума, для этого необходимо либо уменьшить уровень шума, либо усилить сигнал.

Итак, к недостаткам такого типа фотодиодов можно отнести шумовой ток (он появляется в результате генерации пары носителей при отсутствии света), который растет при увеличении приложенного напряжения смещения, также требующее специальное высоковольтное питание [9].

Для всех фотодиодов необходимо учесть, что для образования электронно-дырочной пары энергия поглощаемого кванта $h\nu$ должна быть достаточной для перевода электрона из валентной зоны в зону проводимости, т.е. должно выполняться условие $h\nu \geq E_g$.

Не все поглощаемые кванты образуют импульсы тока. Поэтому ФД оцениваются коэффициентом η -квантовой эффективности, характеризующий эффективность преобразования фотонов в электрический ток. Формула (40) определяет квантовую эффективность

$$\eta = 1,24 \cdot 10^5 S/\lambda, \quad (40)$$

где S – чувствительность, А/Вт;

λ – длина волны оптического сигнала, нм.

В общем случае средний ток I , протекающий через сопротивление нагрузки R_n определяется по формуле (41).

$$I = q \cdot N = q (P / h\nu) = \eta q (P / h \cdot f) = S \cdot P, \quad (41)$$

где q – заряд электронного носителя, $q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл;
 N – число носителей;
 P – мощность оптического излучения, Вт;
 $h\nu$ – энергия кванта, измеряется на Вт·ч или кВт·ч.

Квантовая эффективность высококачественного кремневого ФД можно достигнут до 80 %. На рисунке 50 представлена зависимость квантовой эффективности от длины волны [11].

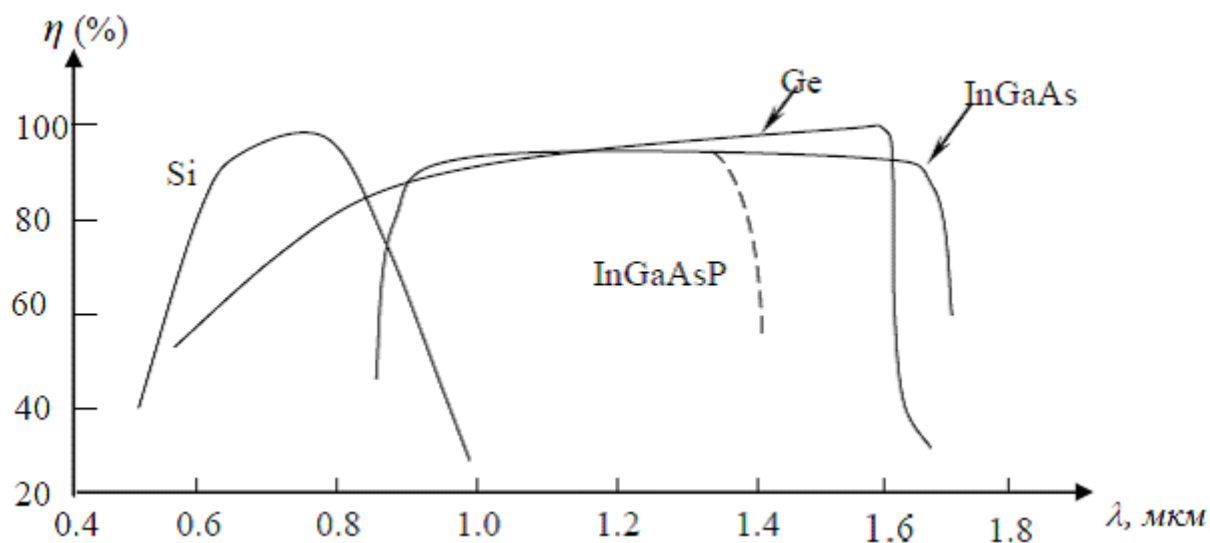


Рисунок 50 – Зависимость квантовой эффективности от длины волны для разных материалов

Выбор элементов системы датчика должен быть оптимальным с точки зрения совместимости среды передачи и приемников сигнала. Используя кремневые фотодиоды, которые работают с максимальной эффективностью на длине волны порядка 800 мкм, коэффициент затухания оптоволокна достигает примерно 2,4 дБ/км. Германиевый фотодиод работает на длинах волн от 600 до 1600 мкм, при этом максимальная эффективность достигается на длине волны около 1600 мкм. Затухание оптоволокна при этой длине волны составляет порядка 0,1 дБ/км.

Наилучшим вариантом выбора фотоприемника является согласованность максимальной эффективности фотодетектора с окном прозрачности оптоволокна.

3 Структурная схема датчика малых перемещений

В данной главе выполнен выбор оптического метода измерения перемещения, составление структурной схемы датчика, ее описание и определение компонентов системы.

3.1 Схема датчика и ее анализ

В данной работе измерение перемещения будет основываться на таком оптическом явлении, как интерференция. Оно применяется во многих измерительных системах и датчиках. Применение оптических волокон делают такие устройства компактными и экономичными.

В данной работе разработан датчик малых перемещений, в основу которого положен волоконно-оптический интерферометр Фабри-Перо, изображенный на рисунке 51.

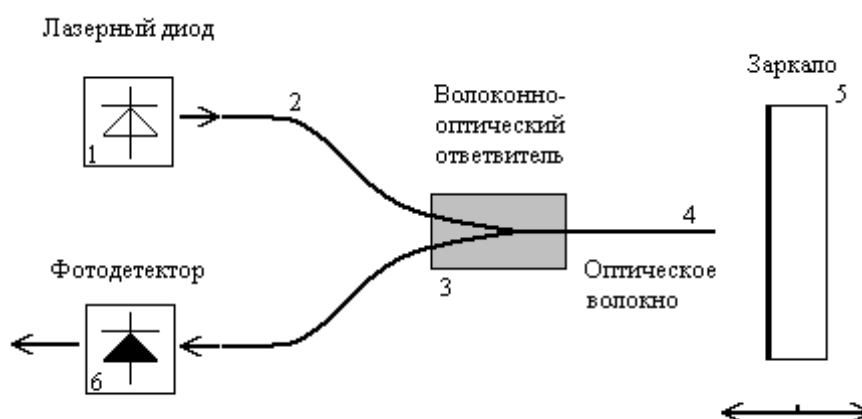


Рисунок 51 – Структурная схема датчика малых перемещений

В схемах волоконно-оптических интерферометров Фабри-Перо вместо зеркал могут использоваться оптические волокна, на торцы которых нанесено напыление или без напыления для низкодобротных интерферометров. При этом коэффициент отражения торца волокна равен френелевскому коэффициенту отражения на границе стекло-воздух $k=0,04$.

При анализе работы волоконно-оптических интерферометров используются такие понятия как «рабочая точка», «склон характеристики» и «интерференционная полоса» (рисунок 52).

Сигнал волоконного интерферометра можно сравнить с изменением интенсивности в точке интерференционной картины чередующихся светлых и темных полос. Поэтому при колебаниях сигнала интерферометра употребляют выражение «сдвиг» и термин «интерференционная полоса», соответствующий изменению сигнала от одного максимума (либо минимума) до следующего, т.е. изменению $\Delta\phi$ на 2π [26].

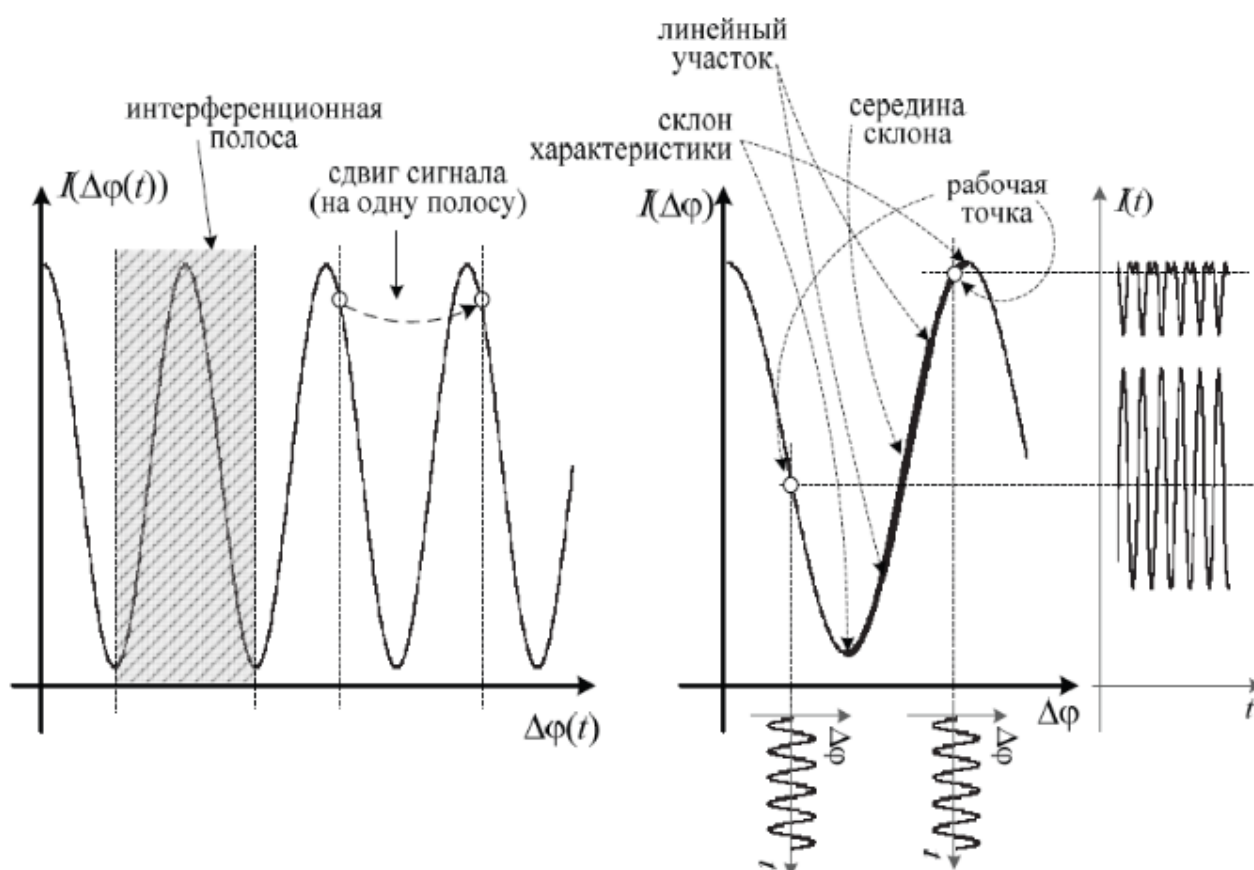


Рисунок 52 – Типичный интерференционный сигнал волоконного интерферометра и его параметры

Основные параметры интерферометра могут быть определены из участка передаточной характеристики вблизи рабочей точки (рисунок 53). Рабочая точка интерферометра выбирается обычно в середине склона линейного участка (между максимумом интенсивности I_{\max} и минимумом I_{\min}).

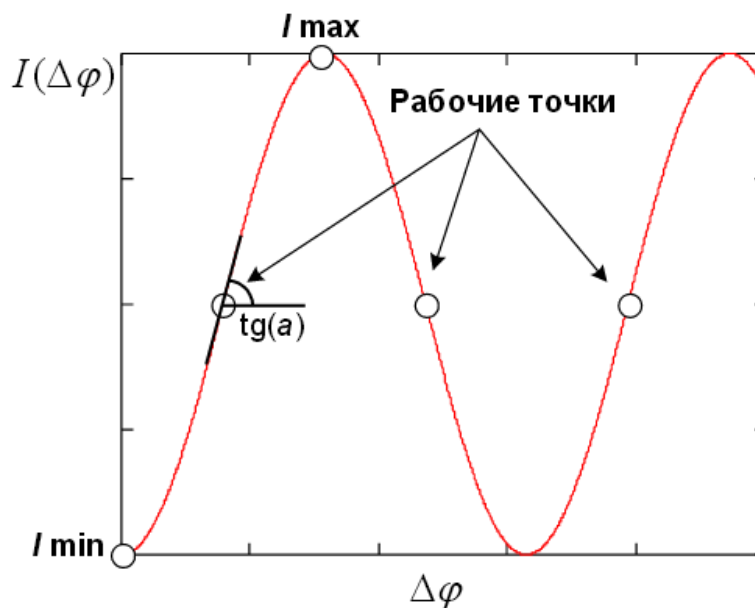


Рисунок 53 – Определение параметров интерферометра

Тангенс угла наклона касательной проведенной в рабочей точке определяет *чувствительность* интерферометра: $s = \text{tg}(a)$.

Интерференционная полоса определяется как расстояние между двумя максимумами или минимумами интенсивности сигнала [27].

Рассмотрим принцип работы волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо, изображенного на рисунке 51. Излучение лазерного диода 1 вводится в оптоволокно 2 и через ответвитель 3 передается на волокно 4. При прохождении излучения через край (торец) волокна 4, часть отражается от него, остальная часть высвечивается в воздух, отражается от зеркала 5 и возвращается обратно в волоконный световод 4. В случае, когда коэффициенты отражения торца волокна и зеркала малы, можно пренебречь многократными переотражениями между зеркалом и волокном и рассматривать двулучевую интерферометрию. Луч, отраженный от торца волоконного световода, интерферирует с лучом, отраженным от зеркала, и на фотоприемнике 6 регистрируется интенсивность излучения, изменяющаяся периодически в зависимости от расстояния x_0 между торцом световода и зеркалом [3].

Рассмотрим случай многолучевой интерферометрии, при котором коэффициент отражения зеркала равен K , а волокна – k . В данном примере часть света, распространяющаяся по оптоволокну, будет отражаться от его

торца и возвращаться в волокно. Другая часть – проходить в зазор между волокном и зеркалом. При этом торец оптоволокна и зеркало образуют интерферометр Фабри-Перо.

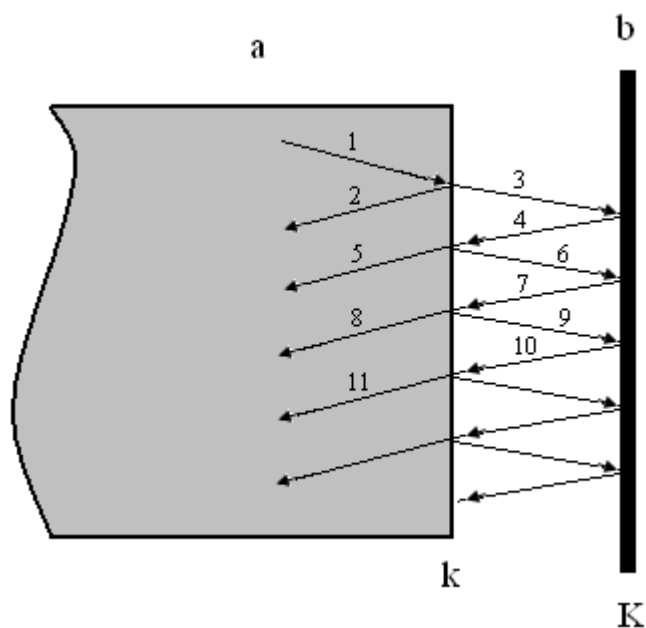
От расстояния между торцом волокна и зеркалом x_0 будет зависеть интенсивность света, отражаемого этим интерферометром обратно в волокно.

Схема интерферометра изображена на рисунке 54, где показаны участки распространения света. Пусть в волокне интенсивность света будет I_0 (участок 1), тогда от торца волокна отразится $I_0 \cdot k$ (участок 2), интенсивности. Далее свет пройдет в зазор интерферометра, интенсивность которого будет равна $I_0 \cdot (1-k)$ (участок 3). От зеркала отразится $I_0 \cdot (1-k) \cdot K$ (участок 4), обратно в волокно попадёт $I_0 \cdot (1-k)^2 \cdot K$ (участок 5) и т. д. Как видно, лучи при переотражении, будут проходить в волокно с уменьшающейся интенсивностью. При этом каждый луч будет иметь дополнительный набег фазы ϕ .

Амплитуды света, отражённого интерферометром Фабри-Перо в волокно рассчитываются по формулам (42), (43), (44) и (45) [3].

$$a_1 = a_0 \sqrt{k}, \quad (42)$$

$$a_2 = -a_0 (1-k) \sqrt{K} \exp(-i\phi). \quad (43)$$



а – оптоволокно, b – зеркало

Рисунок 54 – Схема интерферометра

Имея ввиду, что при отражении от зеркала световая волна смещается по фазе на π (как от более оптически плотной среды), перед выражением для a_2 ставим знак минус.

$$a_3 = -a_0(1-k)\sqrt{K}\sqrt{Kk}\exp(-2i\phi). \quad (44)$$

Знак минус остаётся от предыдущей волны, так как при последовательном переотражении от волокна и зеркала фаза волны меняется на 2π .

$$a_4 = -a_0(1-k)\sqrt{K}\sqrt{(Kk)^2}\exp(-3i\phi). \quad (45)$$

Чтобы найти интенсивность света, отражённого интерферометром Фабри-Перо в волокно, сложим амплитуды соответствующих лучей с их фазами. В результате получаем, что суммарная амплитуда световой волны в волокне будет определяться по формуле (46).

$$a_n = a_0\sqrt{k} - a_0(1-k)\sqrt{K}\exp(-i\phi) \cdot [1 + \sqrt{Kk}\exp(-i\phi) + Kk\exp(-2i\phi) + \dots]. \quad (46)$$

В квадратных скобках – геометрическая прогрессия, просуммировав которую окончательно получим формулу (47).

$$a_n = a_0\sqrt{k} - \frac{(1-k)\sqrt{K}}{\exp(i\phi) - \sqrt{Kk}} a_0. \quad (47)$$

Тогда интенсивность света, отражённого интерферометром Фабри-Перо в волокно, I_n будет определяться по формуле (48) [3].

$$I_n = I_0 \left| \sqrt{k} - \frac{(1-k)\sqrt{K}}{\exp(i\phi) - \sqrt{Kk}} \right|^2, \quad (48)$$

где ϕ – набег фазы световой волны за один обход интерферометра Фабри-Перо (т.е. от волокна к зеркалу и назад).

Набег фазы определяется по формуле (49).

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} x_0. \quad (49)$$

Как уже было ранее сказано, коэффициент отражения торца волокна равен френелевскому коэффициенту отражению на границе стекло-воздух $k=0.04$.

На рисунке 55 изображена кривая изменения интенсивности света отражённого интерферометром, образованного торцом волокна (стекло) $k=0,04$ и зеркалом $K=0,99$ в зависимости от набег фазы интерферирующих лучей. Из определения ϕ , сказанного выше, ясно, что при перемещении зеркала (изменении x_0), набег фазы будет изменяться. При смещении зеркала на четверть длины волны значение ϕ будет составлять π . Из рисунка 55 ясно видно, что интенсивность света принимает минимальное значение при $\phi=2\pi n$, где $n=0,1,2,3\dots$ Интенсивность света принимает максимальное значение при $\phi=\pi(2n+1)$.

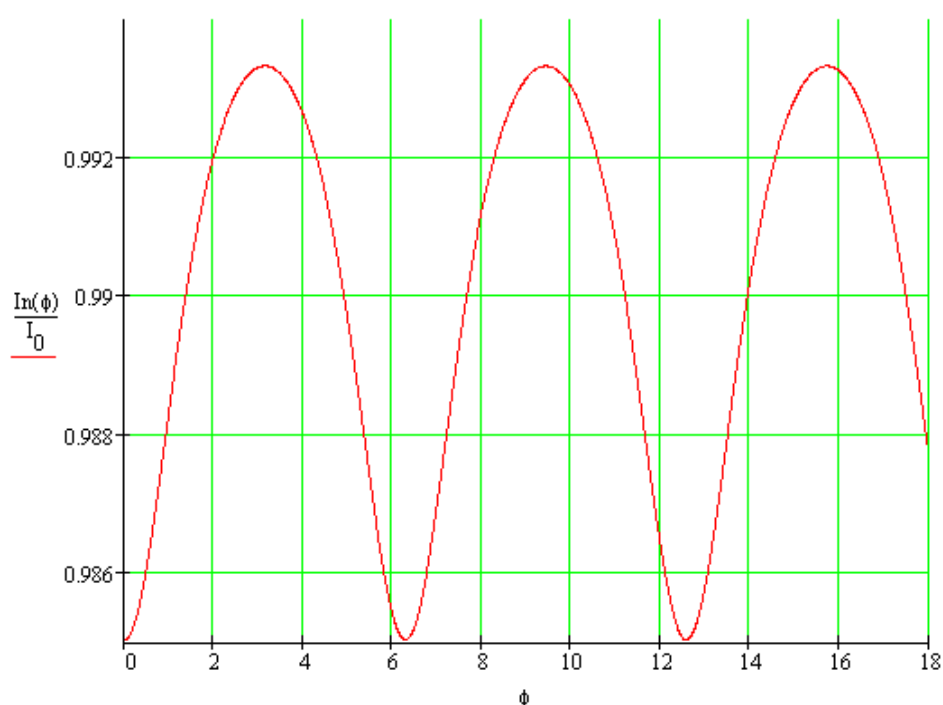


Рисунок 55

Также, воспользовавшись формулой (49) можно изобразить график изменения отношения выходной интенсивности I_n к входной интенсивности I_0 от величины смещения зеркала x_0 (рисунок 56). По полученному рисунку можно увидеть, что при смещении зеркала $x_0=\lambda/2=0.775$ мкм ($\phi=2\pi$) интенсивность принимает наименьшее значение ($I_{\min}=0.985 \cdot I_0$). А при смещении зеркала $x_0=\lambda/4=0.3875$ мкм ($\phi=\pi$) интенсивность принимает наибольшее значение ($I_{\max}=0.993 \cdot I_0$).

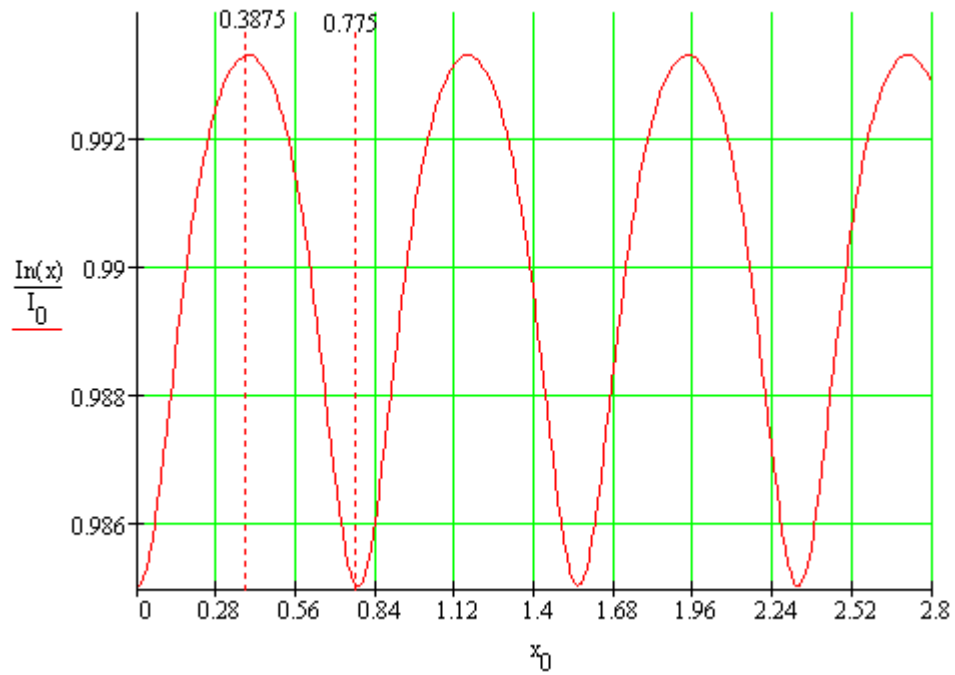


Рисунок 56

Далее на рисунке 57 приведем зависимость изменения интенсивностей в зависимости от изменения коэффициента отражения зеркала K от 0 до 1. При этом максимальная интенсивность отражённого интерферометром света I_{\max}/I_0 изображена красной линией, а минимальная I_{\min}/I_0 – изображена синей линией.

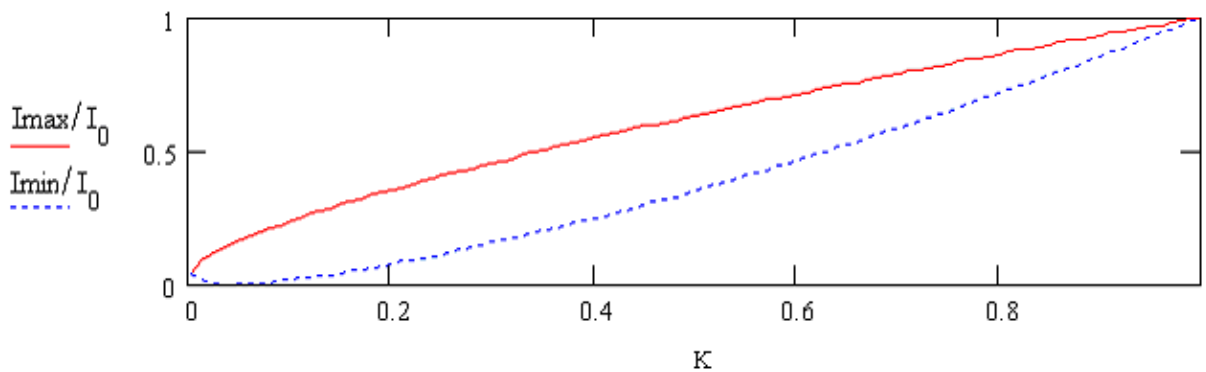


Рисунок 57

Далее построим зависимость изменение видности (контрастности) интерференционной картины $V(K) = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ от изменения коэффициента отражения зеркала K от 0 до 1. Изобразим ее на рисунке 58.

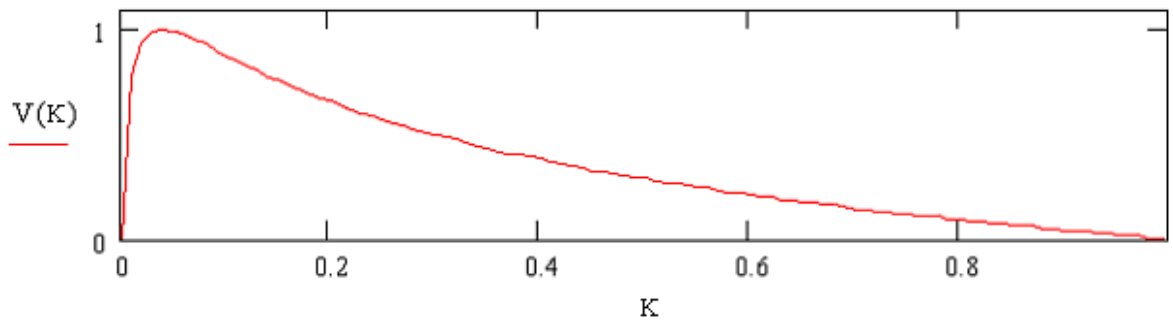


Рисунок 58

Интенсивность света также будет изменяться при изменении коэффициента отражения зеркала K по закону, приведенном в формуле (50). График данной зависимости изображен на рисунке 59.

$$I_n(K) = (I_{\max} - I_{\min}) / I_0. \quad (50)$$

Как и другие элементы системы датчика, отражающее зеркало должно быть выбрано исходя из поставленных требований. Рисунки 58 и 59 показывают нам, что максимальная контрастность интерференционной картины достигается при коэффициенте отражения зеркала $K \approx 0.05$, однако интенсивность света при данном значении коэффициента примерно в 2 раза меньше максимально возможной.

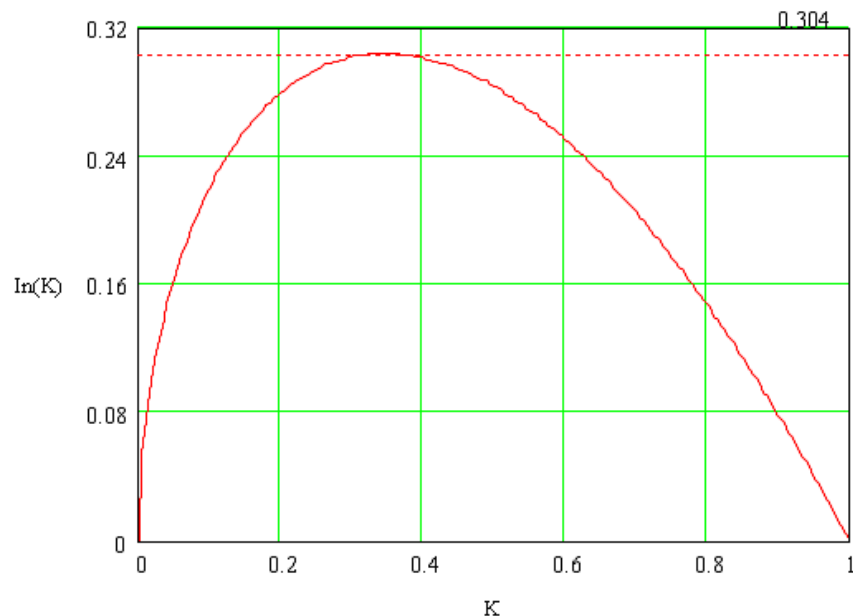


Рисунок 59

Чтобы найти искомое смещение зеркала относительно торца волокна x_0 через регистрируемую выходную интенсивность излучения I_n , необходимо преобразовать формулу (48). Для этого найдем решение выражения (51).

$$\left| c - \frac{b}{\exp(i\phi) - a} \right|. \quad (51)$$

При условии, что a, b, c и ϕ – это действительные величины, то решение вышеупомянутого выражения (51) записывается в виде выражения (52).

$$\sqrt{\frac{b^2 \cdot \sin^2(\phi)}{((\cos(\phi) - a)^2 + \sin^2(\phi))^2} + \left(c - \frac{b \cdot (\cos(\phi) - a)}{(\cos(\phi) - a)^2 + \sin^2(\phi)} \right)^2}. \quad (52)$$

Возведя в квадрат и упростив предыдущее выражение (52) (с помощью функции simplify), получим выражение (53).

$$\frac{(a^2 + 1) \cdot c^2 - 2 \cdot c \cdot \cos(\phi) \cdot (a \cdot c + b) + 2 \cdot a \cdot b \cdot c + b^2}{a^2 - 2 \cdot a \cdot \cos(\phi) + 1}. \quad (53)$$

Далее подставим в выражение (53) вместо a, b и c следующее:

$$a = \sqrt{k \cdot K},$$

$$b = (1 - k) \cdot \sqrt{K},$$

$$c = \sqrt{k}.$$

Теперь решим выражение (53).

$$\begin{aligned} & \frac{((\sqrt{k \cdot K})^2 + 1) \cdot (\sqrt{k})^2 - 2 \cdot \sqrt{k} \cdot \cos(\phi) \cdot (\sqrt{k \cdot K} \cdot \sqrt{k} + (1 - k) \cdot \sqrt{K}) + 2 \cdot \sqrt{k \cdot K} \cdot (1 - k) \cdot \sqrt{K} \cdot \sqrt{k} + ((1 - k) \cdot \sqrt{K})^2}{(\sqrt{k \cdot K})^2 - 2 \cdot \sqrt{k \cdot K} \cdot \cos(\phi) + 1} = \\ & = \frac{(k \cdot K + 1) \cdot k - 2 \cdot \sqrt{k} \cdot \cos(\phi) \cdot (k \sqrt{K} + \sqrt{K} - k \sqrt{K}) + 2 \cdot k \cdot K \cdot (1 - k) + K(1 - k)^2}{1 + k \cdot K - 2 \cdot \sqrt{k \cdot K} \cdot \cos(\phi)} = \\ & = \frac{k^2 \cdot K + k - 2 \cdot \sqrt{k} \cdot \cos(\phi) \cdot \sqrt{K} + 2 \cdot k \cdot K - 2 \cdot k^2 \cdot K + K(1 - 2 \cdot k + k^2)}{1 + k \cdot K - 2 \cdot \sqrt{k \cdot K} \cdot \cos(\phi)} = \\ & = \frac{k^2 \cdot K + k - 2 \cdot \sqrt{k \cdot K} \cdot \cos(\phi) + 2 \cdot k \cdot K - 2 \cdot k^2 \cdot K + K - 2 \cdot k \cdot K + k^2 \cdot K}{1 + k \cdot K - 2 \cdot \sqrt{k \cdot K} \cdot \cos(\phi)} = \frac{k - 2 \cdot \sqrt{k \cdot K} \cdot \cos(\phi) + K}{1 + k \cdot K - 2 \cdot \sqrt{k \cdot K} \cdot \cos(\phi)} = \\ & = \frac{1 + k \cdot K - 2 \cdot \sqrt{k \cdot K} \cdot \cos(\phi) - 1 - k \cdot K + 2 \cdot \sqrt{k \cdot K} \cdot \cos(\phi) + k + K - 2 \cdot \sqrt{k \cdot K} \cdot \cos(\phi)}{1 + k \cdot K - 2 \cdot \sqrt{k \cdot K} \cdot \cos(\phi)} = \\ & = 1 - \frac{1 + k \cdot K - 2 \cdot \sqrt{k \cdot K} \cdot \cos(\phi) - k - K + 2 \cdot \sqrt{k \cdot K} \cdot \cos(\phi)}{1 + k \cdot K - 2 \cdot \sqrt{k \cdot K} \cdot \cos(\phi)} = 1 - \frac{1 + k \cdot K - k - K}{1 + k \cdot K - 2 \cdot \sqrt{k \cdot K} \cdot \cos(\phi)} = \\ & = 1 - \frac{(1 - k)(1 - K)}{1 + k \cdot K - 2 \cdot \sqrt{k \cdot K} \cdot \cos(\phi)}. \end{aligned}$$

Таким образом, формулу (48) можно преобразовать к виду, приведенному в формуле (54) [3].

$$I_n = I_0 \left(1 - \frac{(1 - k)(1 - K)}{1 + kK - 2\sqrt{kK} \cos(\phi)} \right). \quad (54)$$

Из формулы (54) видно, что если коэффициент отражения зеркала K будет равен 1, то зеркало будет отражать 100 % света. То есть интенсивность отраженной волны I_n будет принимать значение интенсивности I_0 .

На рисунке 60 изображена зависимость интенсивности $I_n(\phi)$ при различных значениях коэффициента отражения зеркала K .

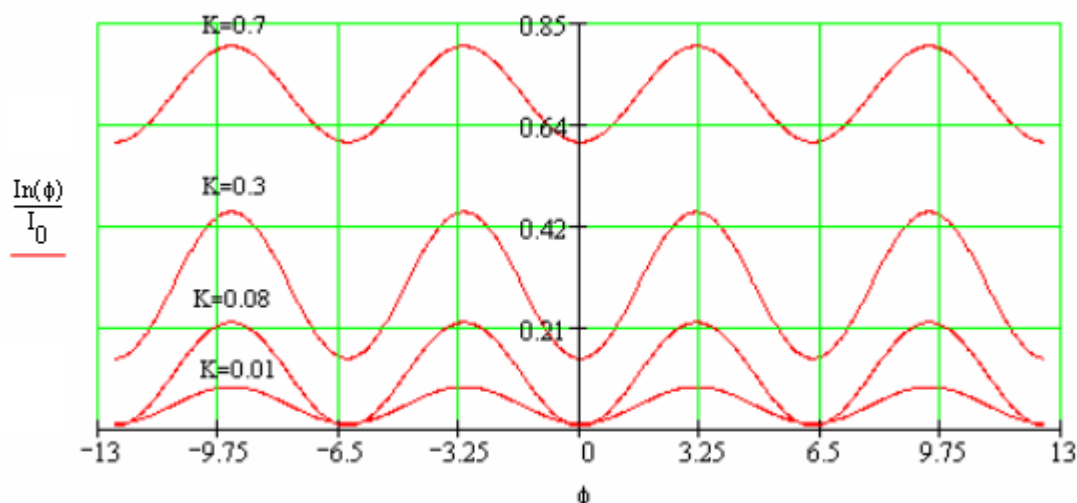


Рисунок 60

Теперь определим искомую величину x_0 . Для этого из формулы (54) выведем уравнение для ϕ , которое представлено в формуле (55).

$$\phi = \arccos\left(\frac{I_0 - I_n + kK(I_0 - I_n) - (1-k)(1-K)I_0}{2\sqrt{kK}(I_0 - I_n)}\right) \quad (55)$$

Учитывая формулу (49), можно вывести зависимость искомого перемещения x_0 , которая представлена в формуле (56).

$$x_0 = \frac{\lambda \cdot \arccos\left(\frac{I_0 - I_n + kK(I_0 - I_n) - (1-k)(1-K)I_0}{2\sqrt{kK}(I_0 - I_n)}\right)}{4\pi} \quad (56)$$

Мощность излучения лазерного модуля можно измерить с помощью фотоприемника. Для этого необходимо при помощи соединительного шнура подать сигнал с оптического выхода лазерного модуля на вход фотоприёмника. При помощи осциллографа (или подключённого параллельно к нему вольтметра) измерить напряжение на выходе фотоприёмника $U_{\text{лаз}}$. Используя

данные для чувствительности фотоприёмника рассчитать уровень оптической мощности в волокне.

Итак, по формуле (56) можно было бы определить величину перемещения зеркала x_0 , если бы не один факт. Выходящему из волоконного световода излучению свойственно расходиться. И если бы угловая расходимость излучения отсутствовала, то при различных фазах, выходная интенсивность могла принимать одинаковые значения (это хорошо видно на рисунке 55). Тогда максимально допустимый сдвиг фаз ϕ , при котором было бы произведено корректное измерение интенсивности, был бы равен π . Отсюда минимально и максимально возможное перемещение зеркала x_0 (при длине волны 1550 нм) достигает значения 0 нм и 390 нм соответственно, теоретически. И на практике минимум определялся бы пороговой чувствительностью фотоприемника, а максимум зависел бы от способа подсчета максимумов и минимумов.

В общем случае процент излучения, отраженного от зеркала и возвращенного в волокно, зависит и от расстояния между отражателями (торцом волокна и зеркалом). Это связано с тем, что свет, исходящий из волокна расходится под некоторым углом и лишь часть его, будучи отраженной от зеркала, попадает обратно в волокно и участвует в интерференции. Это свойство излучения называется угловой расходимостью. Далее оценим изменения эффективного коэффициента отражения зеркала и отношения I_n/I_0 от величины смещения зеркала x_0 с учетом данного свойства.

Пусть излучение из волокна падает под углами от 0 до θ_a . Его можно представить выходящим из точечного источника, расположенного на глубине a от торца волокна (рисунок 61). Типовое значение угла апертуры (θ_a) для одномодового волокна составляет примерно 7 градусов.

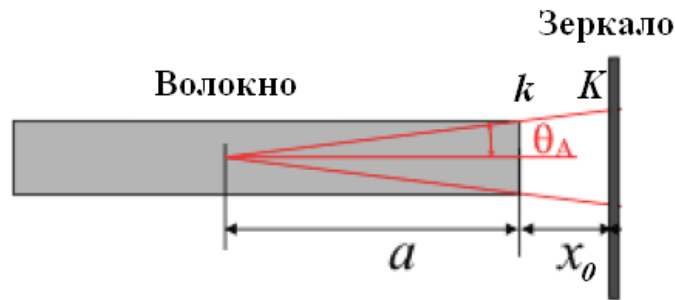


Рисунок 61 – Расходимость излучения из ОВ

Тогда с учетом интенсивности света эффективный коэффициент отражения зеркала K_{eff} можно представить по формуле (57).

$$K_{eff} = \frac{K}{\left(1 + \frac{2 \cdot x_0}{a}\right)^2}. \quad (57)$$

Формула (57) позволяет оценить характер уменьшения коэффициента отражения внешнего зеркала K от расстояния до торца волокна x_0 .

Далее построим график изменения K_{eff} от величины смещения зеркала x_0 . Зная, что диаметр сердцевины одномодового ОВ $D=9$ мкм и $\theta_a=7^\circ$, можно рассчитать значение a :

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(\theta_A) &= \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{a}; \\ a &= \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{\operatorname{tg}(\theta_A)}. \end{aligned}$$

Из этого следует, что искомое значение a будет определяться по формуле (58).

$$a = \frac{9 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot \frac{1}{\operatorname{tg}(0.122)} \approx 36.702 \text{ мкм}. \quad (58)$$

На рисунке 62 изображен график зависимости эффективного коэффициента отражения зеркала K_{eff} от расстояния между зеркалом и торцом волокна x_0 , мкм (при $k=0.04$, $K=0.99$, $\lambda=1.55$ мкм). По нему видно, что K_{eff} уменьшается при увеличении расстояния x_0 : в начальный момент ($x_0=0$ мкм) составляет 0,99, смещение на 200 мкм приводит к его уменьшению примерно в 141 раз и составляет $6,993 \cdot 10^{-3}$.

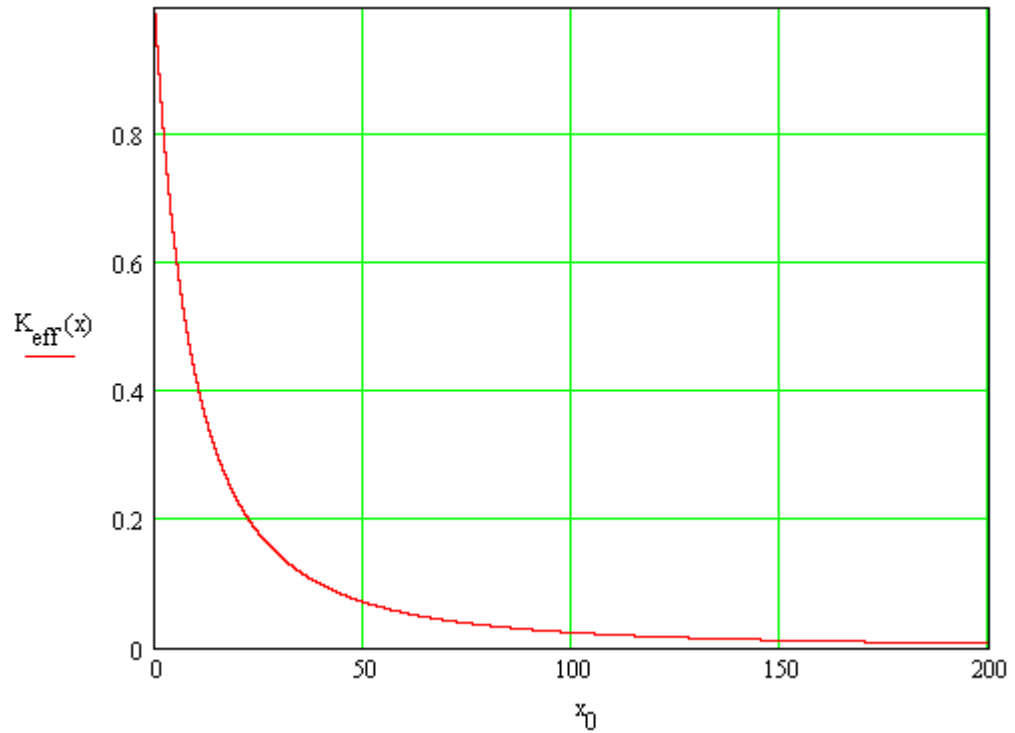


Рисунок 62 – График зависимости эффективного коэффициента отражения зеркала K_{eff} от расстояния между зеркалом и торцом волокна x_0

Подставим в формулу (54) вместо K полученное K_{eff} (при $a=36.702$ мкм, $k=0.04$, $K=0.99$, $\lambda=1.55$ мкм) и получим формулу (59).

$$I_n = I_0 \left(1 - \frac{(1-k)(1-K_{eff})}{1 + kK_{eff} - 2\sqrt{kK_{eff}} \cos(\phi)} \right). \quad (59)$$

Далее в соответствии с формулой (59) построим график зависимости отношения выходной интенсивности I_n к входной интенсивности I_0 от величины смещения зеркала x_0 с учетом угловой расходимости излучения (рисунок 63). По рисунку 63 видно, что отношение I_n/I_0 уменьшается при увеличении x_0 (так же как и K_{eff}). На рисунках 64 и 65 приведена детализация поведения отношения I_n/I_0 . Изменение величины I_n/I_0 имеет колебательный характер, принимая в начальный момент ($x_0=0$ мкм) значение 0,985 (рисунок 64), а при смещении на 200 мкм – колеблется около 0,05 (рисунок 65).

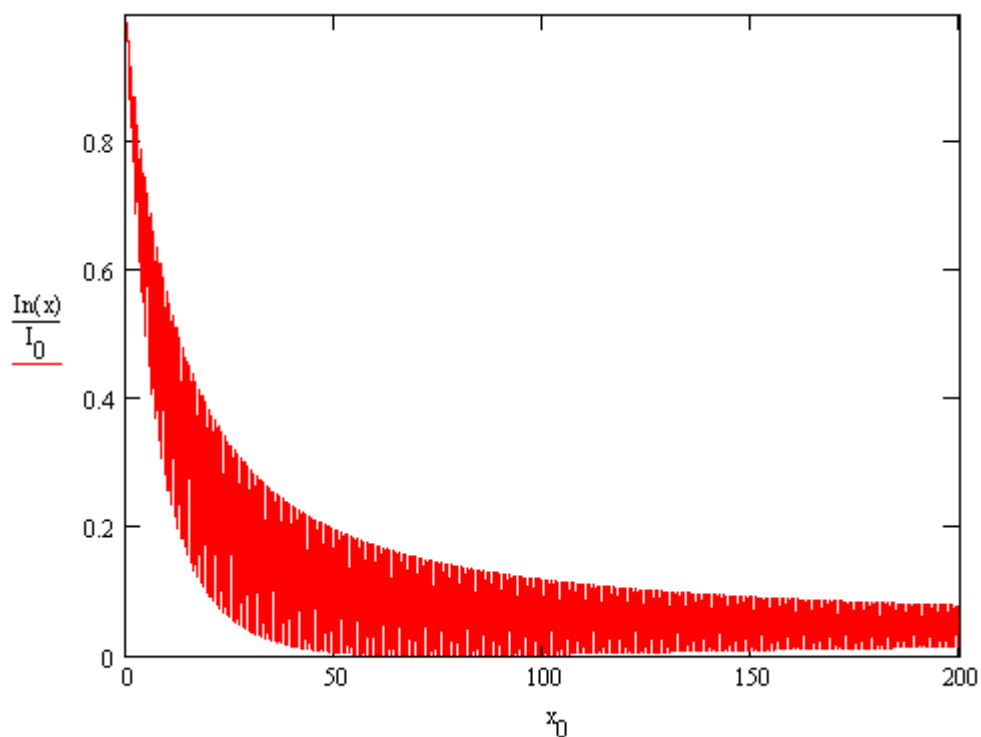


Рисунок 63 – График зависимости отношения выходной интенсивности I_n к входной интенсивности I_0 от величины смещения зеркала x_0 (от 0 до 200 мкм) с учетом угловой расходимости излучения

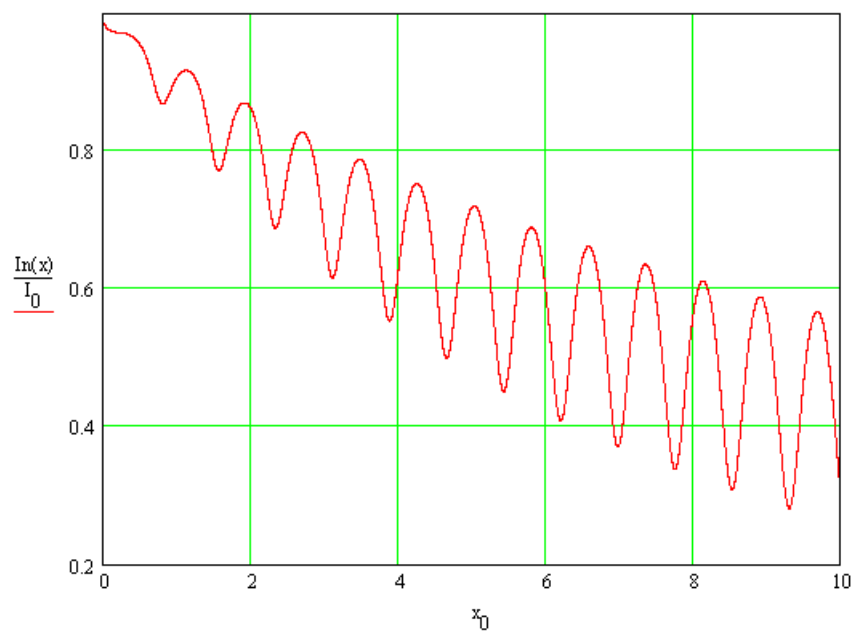


Рисунок 64 – График зависимости отношения выходной интенсивности I_n к входной интенсивности I_0 от величины смещения зеркала x_0 (от 0 до 10 мкм) с учетом угловой расходимости излучения

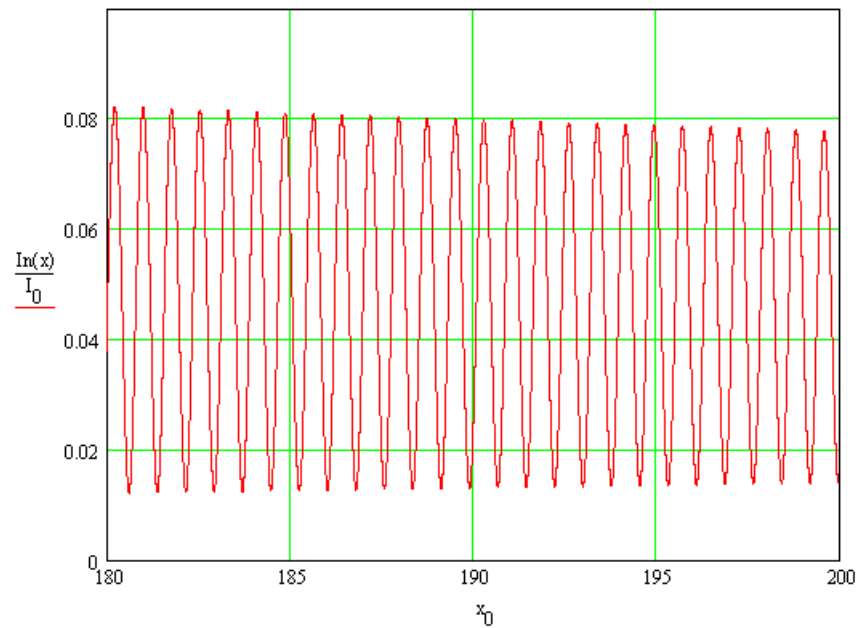


Рисунок 65 – График зависимости отношения выходной интенсивности I_n к входной интенсивности I_0 от величины смещения зеркала x_0 (от 180 до 200 мкм) с учетом угловой расходимости излучения

3.2 Метод эталонирования

Многие датчики, построенные на основе волоконно-оптической техники, используют изменение интенсивности света для определения значения измеряемой величины. Однако величина выходного сигнала, воздействующего на фотоприемник, содержит кроме полезной (измеряемой) составляющей еще и помеховые составляющие (ошибки) [28]. Для минимизации этих ошибок были разработаны следующие методы:

- двойное детектирование;
- линия задержки;
- модуляция длины волны;
- амплитудная модуляция;
- оптический мост;
- и др.

Выбранный метод эталонирования – метод «двойного детектирования». Для отслеживания режима работы источника оптического излучения используется два фотоприемника (рисунок 66).



Рисунок 66 – Эталонирование методом «двойного детектирования»

На данном рисунке D_1 и D_2 – это интенсивности, зарегистрированные фотоприемниками, которые определяются по формулам (60) и (61), соответственно.

$$D_1 = \alpha \cdot M \cdot S, \quad (60)$$

$$D_2 = \beta \cdot S, \quad (61)$$

где α и β – калибровочные постоянные, учитывающие свойства оптических линий передачи;

M – измеряемая физическая величина;

S – это мощность источника.

Исключение мощность источника S позволяет вывести формулу (62).

$$M = \frac{\beta \cdot D_1}{\alpha \cdot D_2}. \quad (62)$$

Этот метод предполагает, что постоянные α , β и чувствительности двух фотоприемников неизменны. Для уменьшения влияния различий оптических путей используют Y-разветвители.

На рисунке 67 изображена полученная структурная схема прибора для измерения малых перемещений на базе интерферометра Фабри-Перо. Здесь первый сплиттер имеет коэффициент деления мощности 50/50. Таким образом, мы добиваемся разделения одного сигнала от источника на два равных. Далее на каждом участке стоят адаптеры, соединяющие оптоволокна друг с другом. Затем на каждом участке находятся два одинаковых сплиттера с коэффициентами деления 5/95. Причем 95 % мощности интерферирующих сигналов (отраженного от торца волокна и от зеркала) поступает на

фотоприемник, а 5 % обратно в первый сплиттер. В верхней схеме происходит перемещение зеркала 1, величину которого и мы измеряем. В нижней схеме зеркало 2 не перемещается.

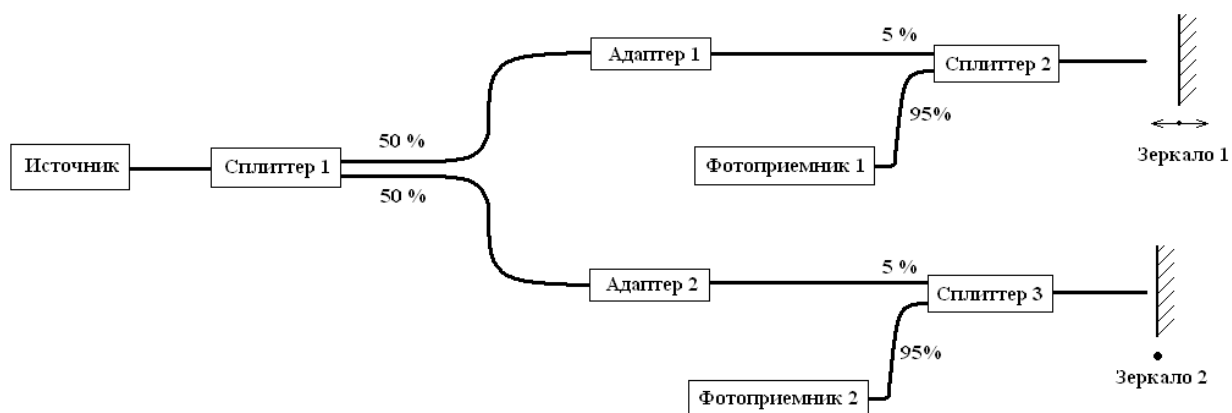


Рисунок 67 – Структурная схема датчика

Таким образом, мы уменьшаем значение погрешности, которая может быть вызвана нестабильностью источника и приемника сигнала, температурным дрейфом, а так же при соединении волокон друг с другом и др.

3.3 Компоненты устройства. Наладка и испытание опытного образца

Выбранный метод основан на явлении интерференции света, поэтому свет, излучаемый источником, желательно должен быть когерентным. Исходя из того, что светодиоды являются источником некогерентного излучения, выбор источника излучения был сделан только из лазерных источников.

В качестве источника оптического излучения был выбран источник лазерного излучения Grandway FHS1D02 (рисунок 68). Он может работать в непрерывном или модулированном режиме, обеспечивая высокую стабильность излучения. Прибор имеет небольшие размеры и вес, подходит для работы внутри и вне зданий. Снабжен фиксированным оптическим портом FC/PC на две длины волны. Технические характеристики источника излучения приведены в таблице 8.



Рисунок 68 – Источник лазерного излучения Grandway FHS1D02

Таблица 8 – Технические характеристики Grandway FHS1D02

Параметр	Значение
Длина волны, нм	1310, 1550
Тип излучателя	LD
Тип коннектора	FC/PC
Стабильность излучения	В течении 15 мин: <0,1 дБ В течении 5 часов и дольше: <0,2 дБ
Центральная длина волны	1310±20 нм; 1550±20 нм
Ширина спектра	3 дБ
Частота модуляции	270 Гц, 1 кГц, 2 кГц
Выходная мощность	0,316 мВт
Автовыключение	Есть
Подсветка	Есть
Температура эксплуатации	от минус 10 до плюс 50 °С
Температура хранения	от минус 20 до плюс 70 °С
Питание	Аккумулятор Li-ion, AC/DC адаптер питания
Габариты (Д x Ш x В)	115 x 65 x 30 мм
Вес	140 г

В схеме (рисунок 67) сплиттер используется для деления светового сигнала от одного порта (источника излучения) к двум другим (зеркалу и приемнику излучения).

При разработке мы будем использовать сплавные разветвители, так как они позволят разделить оптический сигнал в заданных пропорциях, вплоть до соотношения 1/99. В нашем случае используются сплиттеры с делением мощности 50/50 и 5/95 (5 % мощности сигналов, отраженных от торца волокна и зеркала, возвращается к источнику излучения, а остальные 95 % к фотоприемнику). Рабочая длина волны у таких ответвителей составляет 1310,

1490 и 1550 нм. Технические характеристики оптических разветвителей (сплитеров) приведена в таблице 9.

Таблица 9 – Технические характеристики оптических сплитеров

Рабочая длина волны, нм		1310, 1490, 1550
Полоса пропускания, нм		± 40
Внутренние потери, дБ (макс)		0.1-0.2
Вносимые потери, дБ (макс)	50/50	3.6/3.6
	5/95	15.2/0.45
Поляризационные потери, дБ (макс)		0,15
Температурный коэффициент, дБ/°C		0.002
Рабочая температура, °C		от минус 20 до плюс 70
Температура хранения, °C		от минус 40 до плюс 85
Рабочая мощность, мВт (макс)		300

В качестве фотоприемника был выбран фотодиод ФД-3А (рисунок 69). Это германиевый фотодиод. На рисунке 70 изображена типовая спектральная характеристика германиевых фотодиодов, диапазон которой составляет от 0,4 до 1,8 мкм. При этом максимум спектральной характеристики находится в диапазоне длин волн от 1,5 до 1,6 мкм.



Рисунок 69 – Фотодиод ФД-3А

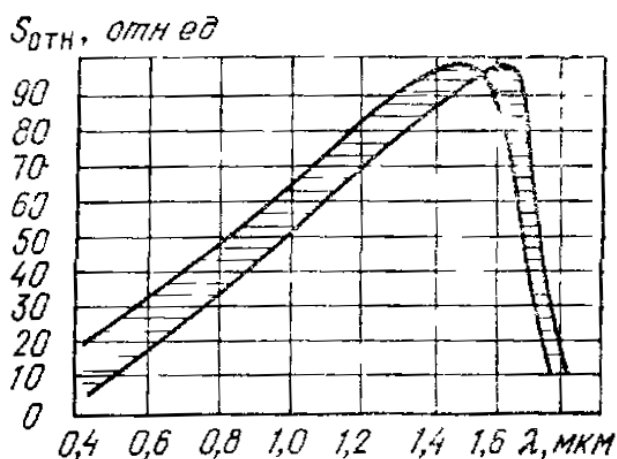


Рисунок 70 – Спектральная характеристика фотодиода ФД-3А

В таблице 10 приведены основные характеристики выбранного фотодиода ФД-3А [29].

Таблица 10 – Основные характеристики фотодиода ФД-3А

Характеристика	Наименование, значение
Тип	ФД-3А
Материал	Германий (Ge)
Диаметр фоточувствительного элемента, мм	2,45
Диапазон спектральной характеристики $\Delta\lambda$, мкм	от 0,4 до 1,8
$\lambda_{\text{макс}}$ чувствительность, мкм	от 1,5 до 1,6
Основные параметры при температуре от 19 до 25 °С	
Рабочее напряжение U_p , В	10
Темновой ток I_T , мкА, не более	10
Токовая интегральная чувствительность $S_{I \text{ инт}}$, мА/лм	6,5
Пороговый поток излучения, лм, не более	$1,8 \cdot 10^{-10}$
Постоянная времени τ , с, не более	$5 \cdot 10^{-6}$
Темновое сопротивление R_T , МОм, не менее	50
Масса, г, не более	0,8

На рисунке 71 показана механическая часть передвижения зеркала (механическая подсистема) опытного образца, реализующего измерение малых длин. Зеркало находится на одном торце поршня, при этом другой торец жестко закреплен с винтом, вкрученным в гайку. Перемещение зеркала происходит посредством поворота винта. Резиновая прокладка предотвращает поворот зеркала вместе с винтом.



Рисунок 71 – Механическая подсистема

Если учесть, что шаг резьбы данного винта составляет 0,7 мм, то поворот винта на 180 градусов приведет к перемещению зеркала на 350 мкм.

Как правило, фотодиоды работают в одном из двух режимов: фотovoltaическом или фотодиодном (рисунок 72).

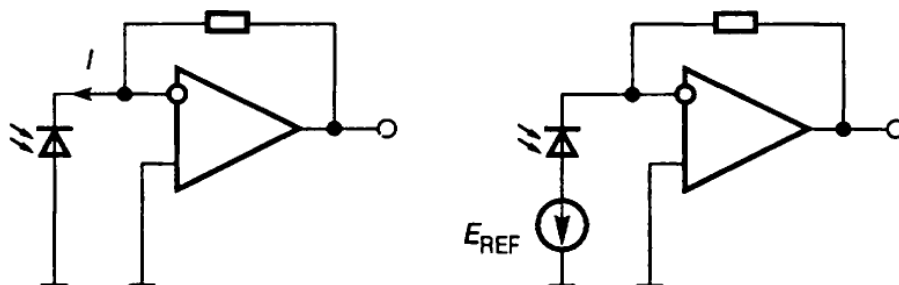


Рисунок 72 – Схемы включения фотодиодов в фотovoltaическом (слева) и фотодиодном (справа) режимах

В фотovoltaическом режиме фотодиод может быть представлен источником тока с внутренним сопротивлением в виде параллельной цепочки $R_D C_D$ (рисунок 73). В этом случае операционный усилитель работает в режиме преобразователя тока в напряжение. При медленных изменениях светового потока влиянием емкости C_D можно пренебречь. Поскольку на инвертирующем входе усилителя поддерживается практически нулевой потенциал (виртуальная земля), ток через сопротивление R_D равен нулю [30].

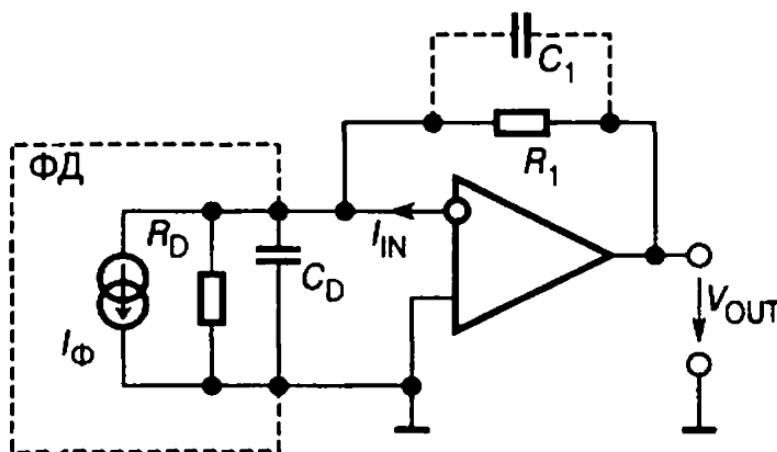


Рисунок 73 – Расчетная схема фотодиода в фотovoltaическом режиме

Если считать, что входной ток операционного усилителя близок к нулю, то весь фототок I_Φ будет протекать через резистор R_1 , и тогда выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ может быть рассчитано по формуле (63).

$$U_{\text{вых}} = -I_{\phi} \cdot R_1 \quad (63)$$

Так как более линейная работа достигается в фотовольтаическом режиме фотодиода, который кроме этого характеризуется малым тепловым шумом (Джонсона) и отсутствием темнового тока, поэтому выбираем данный режим работы фотодиода.

При изменении освещенности от 0,003 лк (ясная безлунная ночь) до 3000 лк (прямой солнечный свет) фототок фотодиода изменяется в пределах от 30 пА до 30 мкА. Это соответствует динамическому диапазону 120 дБ. Для того чтобы влияние входного тока усилителя было несущественным, он должен быть менее 3 пА.

В качестве операционного усилителя был выбран AD795. Это обладающий низким шумом прецизионный операционный усилитель (ОУ) с входным каскадом на полевых транзисторах. Он одновременно обеспечивает крайне низкий шум напряжения и малый дрейф напряжения смещения, характерные для ОУ с входным каскадом на биполярных транзисторах, и очень малый входной ток смещения, характерный для устройств с входным каскадом на полевых транзисторах.

Операционный усилитель AD795 имеет максимальный входной ток смещения 2 пА и максимальное входное напряжение смещения 500 мкВ, а также малый потребляемый ток – 1,5 мА. Дрейф входного напряжения смещения AD795 гарантированно не превышает значения 10 мкВ/°С.

ОУ AD795 работает в температурном диапазоне от 0 °С до +70 °С и выпускается в 8-выводном корпусе SOIC.

На рисунке 74 изображена схема включения фотодиода. В данной схеме используется Т-образная обратная связь, которая позволяет повысить коэффициент преобразования без использования высокоомных резисторов. Параллельно резистору обратной связи подсоединен конденсатор небольшой емкости. Напряжение питания E_p операционного усилителя составляет ± 15 В.

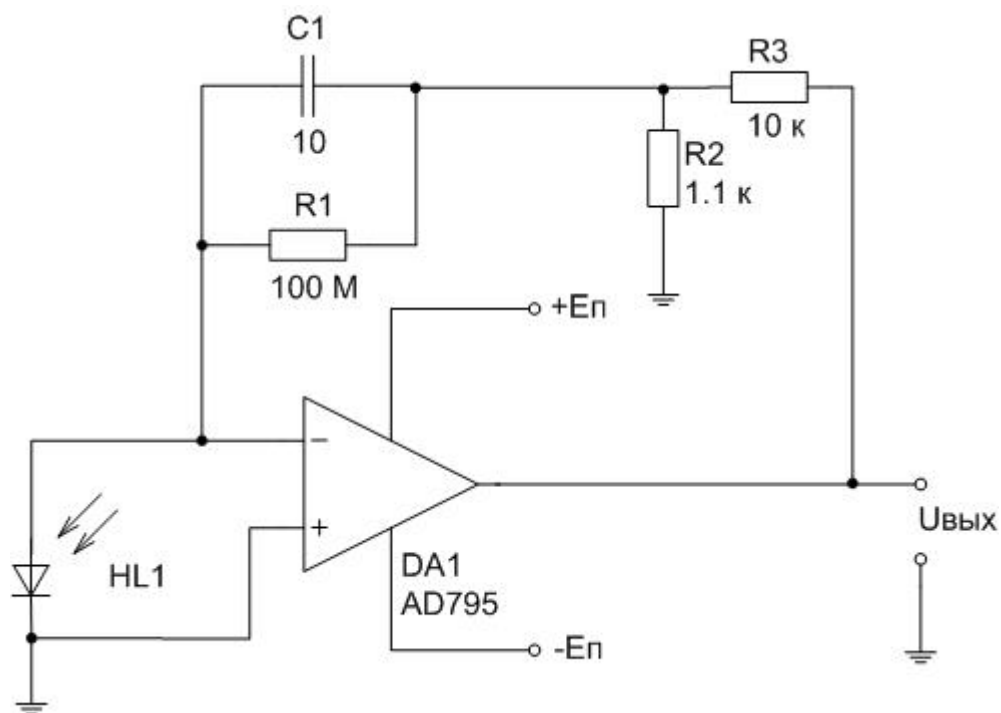


Рисунок 74 – Схема включения фотодиода

Включение в схему дополнительных конденсаторов по 0,1 мкФ позволит уменьшить помехи от источника питания (рисунок 75).

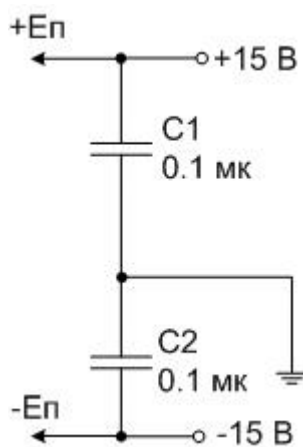


Рисунок 75 – Подключение фильтра в схему

Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ схемы, изображенной на рисунке 74, будет рассчитано по формуле (65).

$$U_{\text{вых}} = I_{\phi} \cdot R_1 \cdot \left(1 + \frac{R_3}{R_2} \right). \quad (65)$$

Далее были собраны две электрических схемы для двух приемных фотодиодов. Один из них принимает интерферирующий сигнал от

стационарного зеркала, а другой – от подвижного. При этом номиналы резисторов и конденсатора равны следующему:

- $R_1=100 \text{ МОм}$;
- $R_2=1,1 \text{ кОм}$;
- $R_3=10 \text{ кОм}$;
- $C_1=10 \text{ пФ}$.

На рисунке 76 изображена полученная схема включения фотодиода.

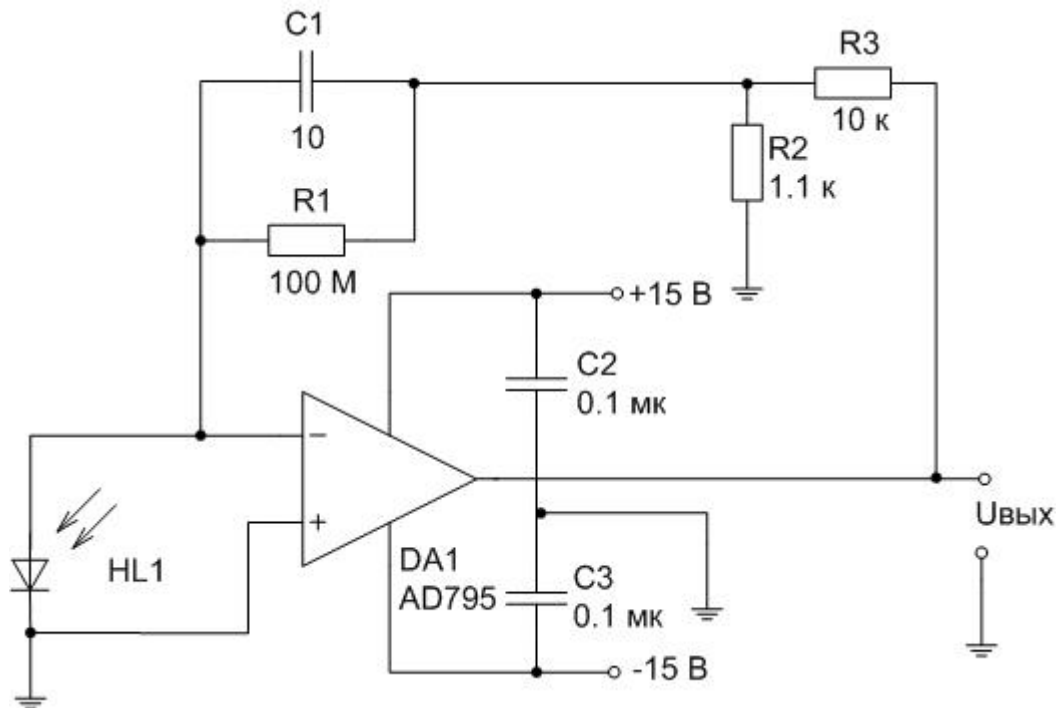


Рисунок 76 – Схема включения фотодиода

Таким образом, выходное напряжение, величина которого зависит от фототока I_ϕ , будет рассчитано по формуле (65).

$$U_{\text{вых}} = I_\phi \cdot 100 \cdot 10^6 \cdot \left(1 + \frac{10 \cdot 10^3}{1.1 \cdot 10^3} \right) \approx I_\phi \cdot 10^9. \quad (65)$$

После построения оптической подсистемы и электрических схем приема сигналов, был проведен ряд экспериментов. В ходе которых было установлено, что операционный усилитель находится в режиме насыщения. При этом подключенный к выходу осциллограф на обоих выводах (для двух зеркал) регистрировал напряжение 14 В, и система никак не реагировала на смещение зеркала.

Исходя из полученного результата, дальнейшие действия были направлены на усовершенствование схемы с целью уменьшения погрешности.

Учитывая факт, что преобразователи тока в напряжение с большим коэффициентом усиления являются высокочувствительными, высокоомными схемами, весь преобразователь был помещен в экранирующий металлический корпус [31]. Так как выводы фотодиода находятся снаружи этого корпуса, то их выводы так же были экранированы металлической оплеткой (рисунок 77).

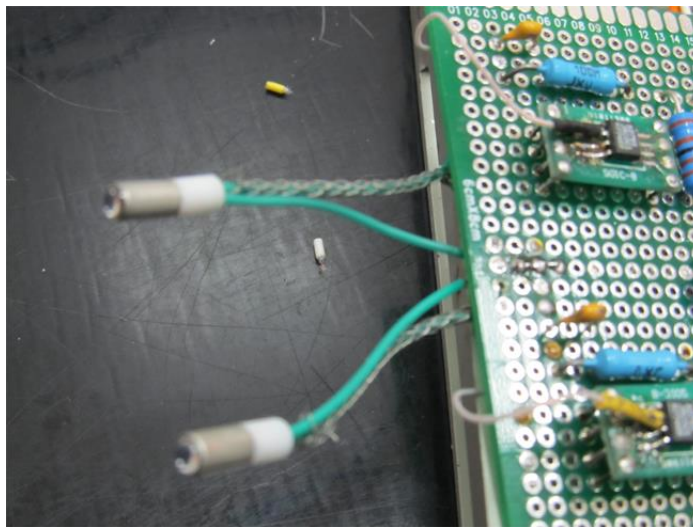


Рисунок 77 – Экранированные выводы фотодиодов

Кроме этого, конструктивным недостатком ОУ является наличие на их входе начального смещения. Т.е. при отсутствии входного сигнала, значение выходного напряжения будет отлично от нуля. Выходное напряжение смещение $U_{см. вых}$, мВ рассчитывается по формуле (66).

$$U_{см. вых} = U_{см. вх} + I_{см. вх} \cdot R_1 \cdot \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right), \quad (66)$$

где $U_{см. вх}$ – входное напряжение смещения, мВ,

$I_{см. вх}$ – входной ток смещения, мкА.

Все подключения к входу ОУ необходимо выполнить через изоляционную тефлоновую стойку. Таким образом, вывод инверсного входа загибают вверх и припаивают непосредственно на тефлоновую стойку, минуя отверстие в печатной плате (рисунок 78).

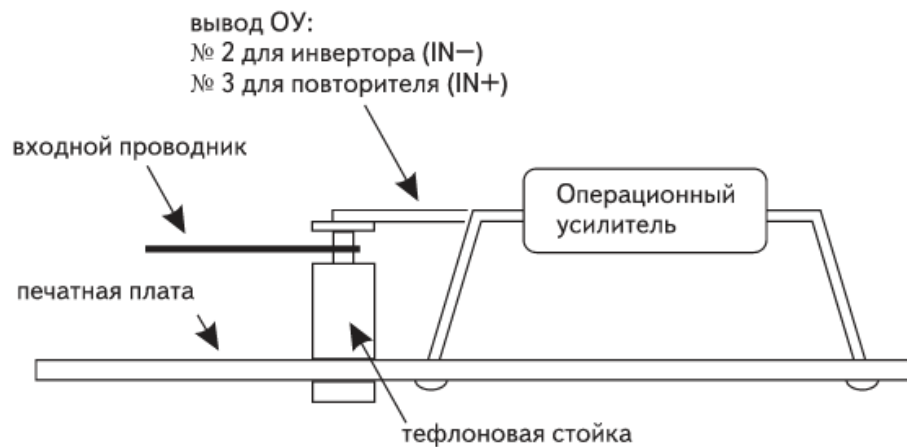


Рисунок 78 – Входной контакт, подключаемый через изоляционную стойку из тефлона

На рисунке 79 изображена полученная схема включения фотодиода, выполненная на макетной плате.

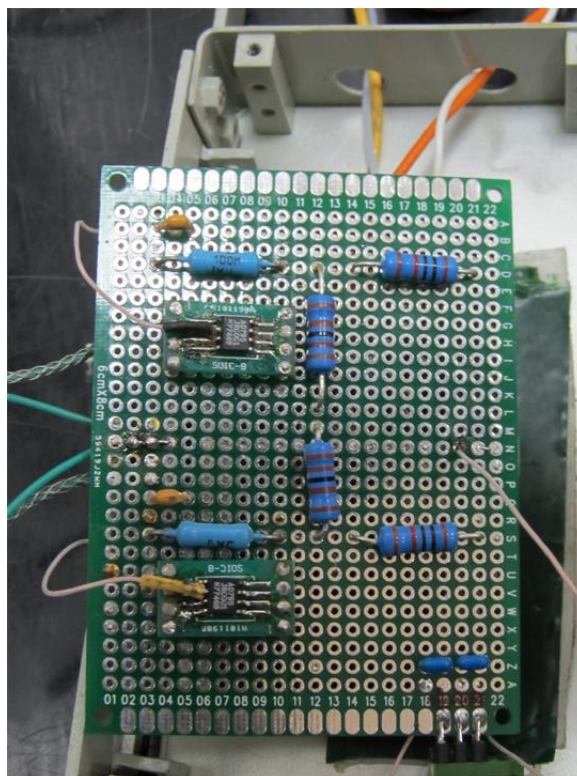


Рисунок 79 – Схема включения фотодиода

Для уменьшения величины $U_{см. вх}$ к неинвертирующему входу ОУ была подсоединена схема компенсации смещения нуля ОУ (рисунок 80).

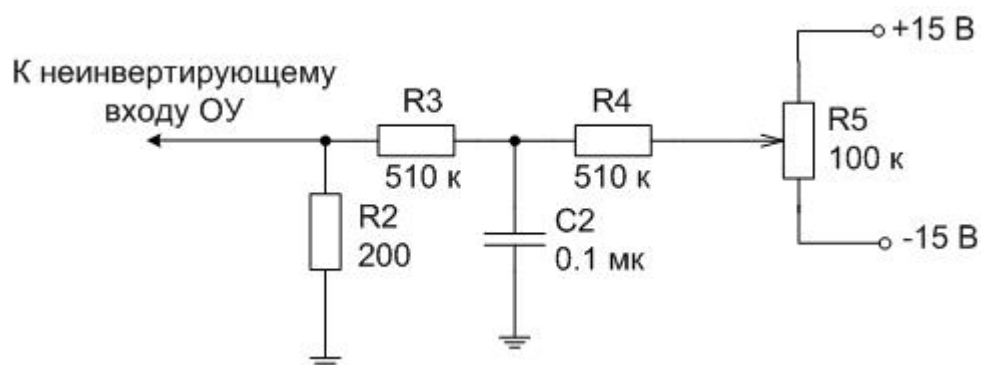


Рисунок 80 – Схема компенсации смещения нуля

На рисунке 81 изображена схема включения фотодиодов с подключенной к ней схемой компенсации смещения нуля ОУ.

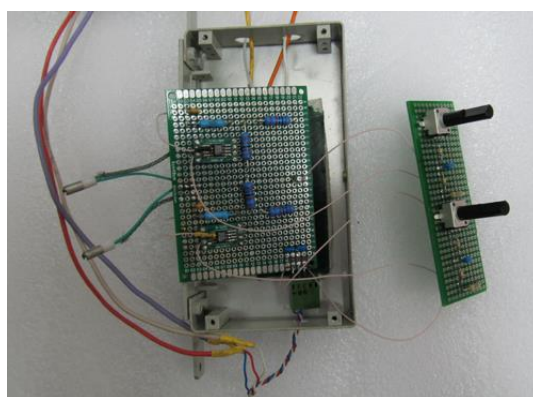


Рисунок 81

После подключения указанной выше схемы компенсации смещения нуля и проведения нескольких попыток довести его до минимума был сделан вывод, что шаг изменения сопротивления у выбранного потенциометра достаточно велик. Поэтому было принято решение изменить схему компенсации. Кроме этого для более точной подстройки вместо регулировочного переменного резистора (выбранного ранее) был взят подстроечный переменный резистор. На рисунках 82 и 83 изображена скорректированная схема компенсации смещения нуля ОУ.

Посредством подключения скорректированной схемы компенсации смещения нуля ОУ и регулировки подстроечного резистора было достигнуто уменьшение входного смещения напряжения.

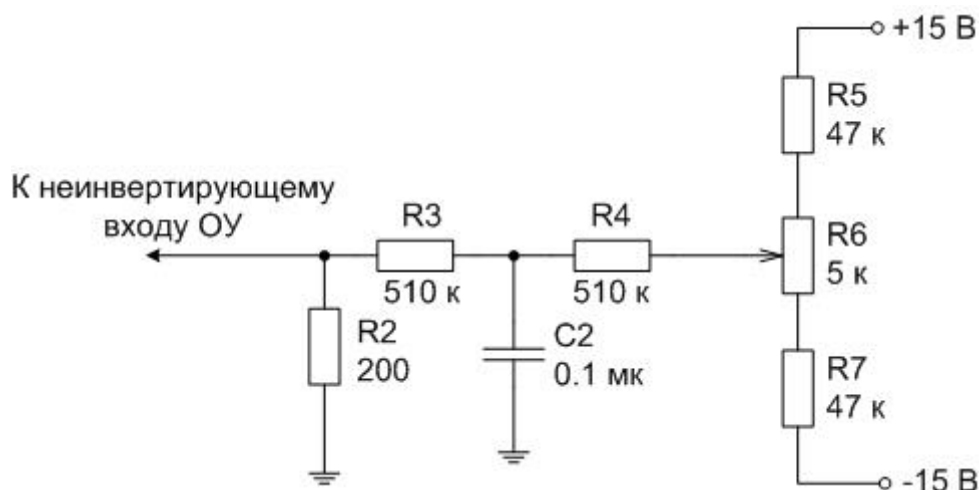


Рисунок 82 – Скорректированная схема компенсации смещения нуля ОУ

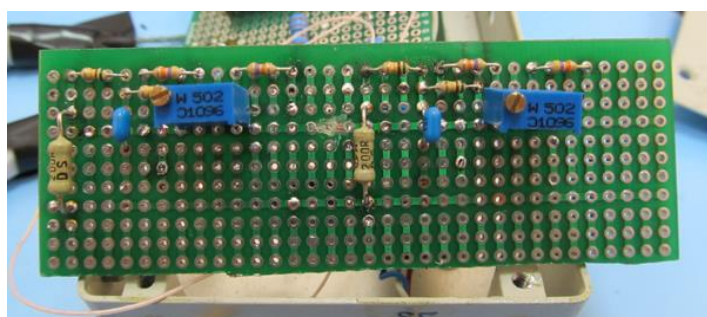


Рисунок 83 – Скорректированная схема компенсации смещения нуля ОУ на печатной плате

Были проведены меры по уменьшению погрешности схемы, однако это не принесло ожидаемого результата. Подключенный к обоим выводам осциллограф регистрировал напряжение 14 В, а это означало, что ОУ все еще находился в режиме насыщения. Поэтому было принято решение об уменьшении коэффициента усиления.

Исходя из формулы (67) можно сказать, что для уменьшения выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ нужно уменьшить значение сопротивления R_1 или R_3 (рисунок 76).

$$U_{\text{вых}} = I_{\phi} \cdot R_1 \cdot \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right). \quad (67)$$

Было принято решение убрать из схемы резисторы R_2 и R_3 . Теперь выходное напряжение рассчитывается по формуле (68) и зависит от величины входного фототока I_{ϕ} и величины сопротивления резистора R_1 .

$$U_{\text{вых}} = I_{\phi} \cdot R_1. \quad (68)$$

После проведения нескольких экспериментов по приближению и отдалению зеркала от торца волокна было установлено, что при их максимальном сближении выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}=14$ В. Поэтому вместо ранее взятого резистора R_1 номиналом 100 МОм, был взят резистор номиналом 10 МОм, а затем и номиналом 1 МОм. Скорректированная схема включения фотодиода показана на рисунке 84.

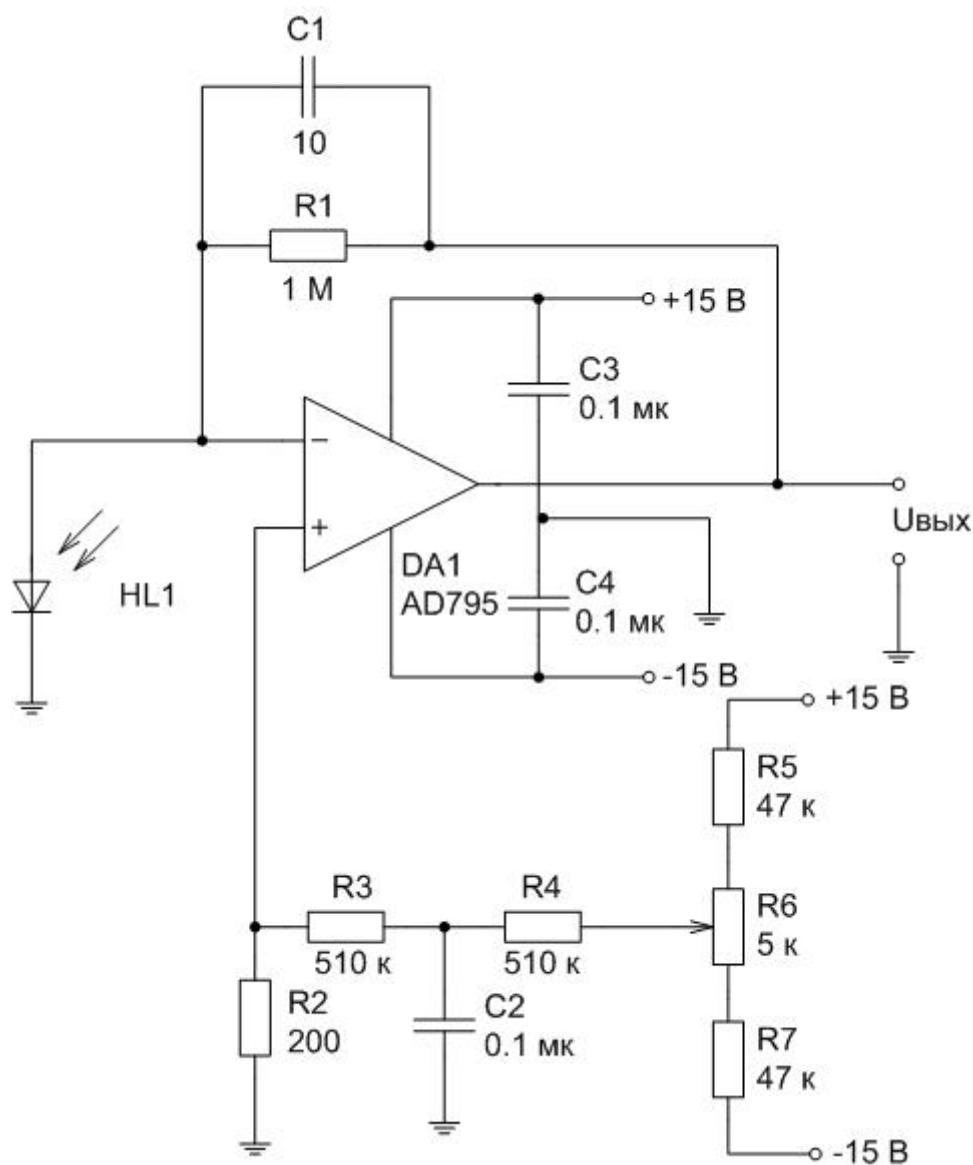


Рисунок 84 – Скорректированная схема включения фотодиода

На рисунке 85 приведено собранное устройство. На нем видно взаимное расположение источника оптического излучения Grandway FHS1D02, оптического волокна, механической части передвижения зеркала (механической подсистемы) и фотодиоды, включенные в схему преобразователя ток-напряжение.

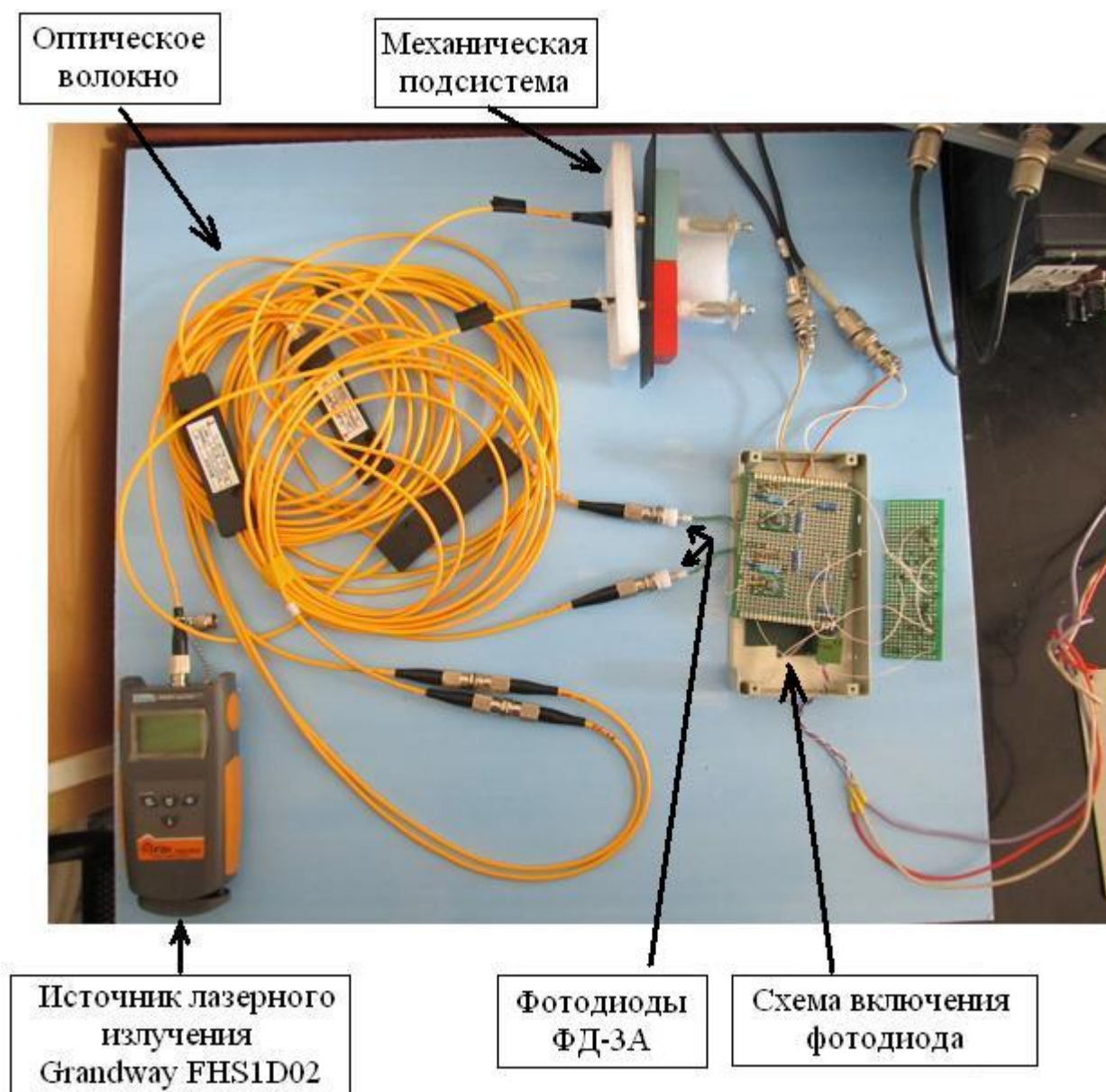


Рисунок 85 – Опытный образец

Далее был проведен ряд измерений выходного напряжения с двух фотодиодов. При этом к первому фотодиоду (первый канал) приходит излучение от неподвижного плотно прижатого к торцу волокна зеркала (первое зеркало), а ко второму фотодиоду (второй канал) – от подвижного зеркала (второе зеркало). Первое измерение проводилось при плотном касании зеркала и торца волокна ($x_0=0$ мкм). Далее первое зеркало осталось неподвижным, а второе зеркало посредством поворота винта отдалялось от торца волокна. Измерение выходного напряжения проводилось при повороте винта до 720° , что соответствует смещению зеркала на 1400 мкм относительно торца волокна. Результаты измерения приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Результаты измерения

Поворот винта, градусы	Смещение x_0 , мм	Выходное напряжение первого канала U_1 , В	Выходное напряжение второго канала U_2 , В	Отношение выходного напряжения второго канала к выходному напряжению первого канала U_2/U_1
15	0	6.828	5.422	0.794
20	0.039	6.948	4.677	0.673
50	0.097	6.681	4.904	0.734
70	0.136	6.740	4.262	0.632
100	0.194	6.731	3.411	0.507
140	0.272	6.696	2.857	0.427
165	0.321	6.777	3.154	0.465
180	0.35	6.867	2.454	0.357
200	0.389	6.841	2.181	0.319
215	0.418	6.766	2.004	0.296
230	0.447	6.827	1.709	0.250
270	0.525	6.976	1.370	0.196
290	0.564	6.817	0.432	0.063
325	0.632	6.964	0.251	0.036
360	0.700	6.796	0.249	0.037
720	1.400	6.768	0.228	0.034

На рисунке 86 приведены результаты измерения напряжения с первого и второго каналов (U_1 , В и U_2 , В соответственно) и их аппроксимирующие кривые. По данным кривым видно, что напряжение U_1 в течение всего процесса измерения практически было неизменным, в то время как напряжение U_2 уменьшалось при увеличении расстояния между торцом волокна и зеркалом.

Далее был построен график зависимости отношения выходного напряжения U_2 , В к выходному напряжению U_1 , В от расстояния между торцом волокна и зеркалом x_0 , мм и ее аппроксимирующая кривая (рисунок 87). По ней видно, что величина U_2/U_1 уменьшается при увеличении x_0 .

Зная, что интенсивность I , Вт/м² – это отношение мощности сигнала P , Вт к площади излучаемой поверхности S , м² (формула 69), можно определить отношение интенсивностей.

$$I = P / S . \quad (69)$$

Так как на фотодиод поступает излучение из волокна, то S – это эффективная площадь поперечного сечения волокна, в которой сосредоточено распространяющееся излучение, и приблизительно равная площади поперечного сечения сердцевинки волокна. Учитывая то, что оптоволокно

одинаковое и диаметр сердцевин у них одно и то же, следовательно отношение интенсивности второго канала I_2 , Вт/м² к интенсивности первого канала I_1 , Вт/м² определяется по формуле (70).

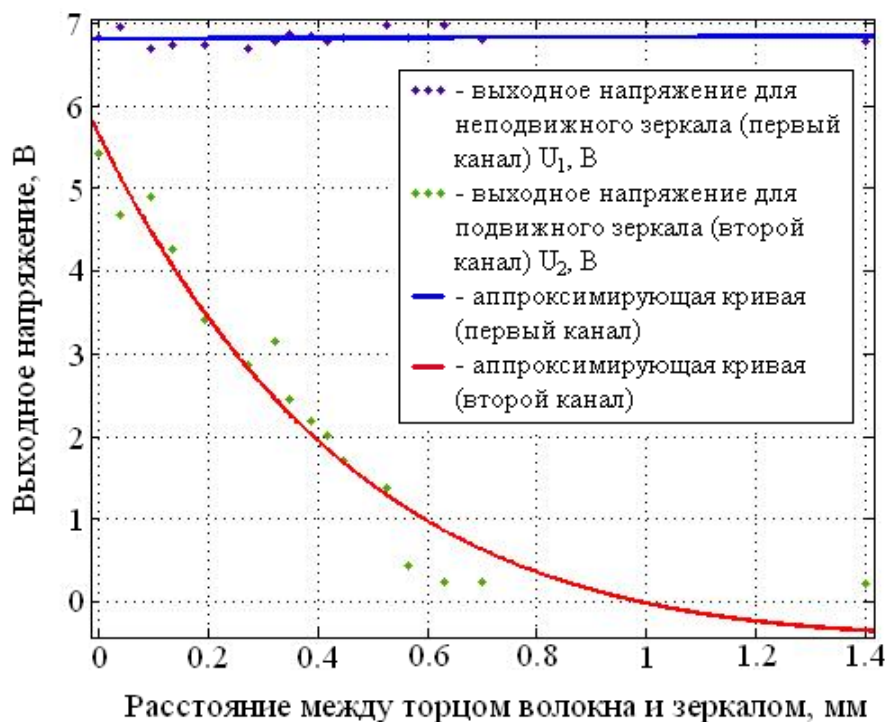


Рисунок 86 – Зависимость выходного напряжения от расстояния между торцом волокна и зеркалом x_0

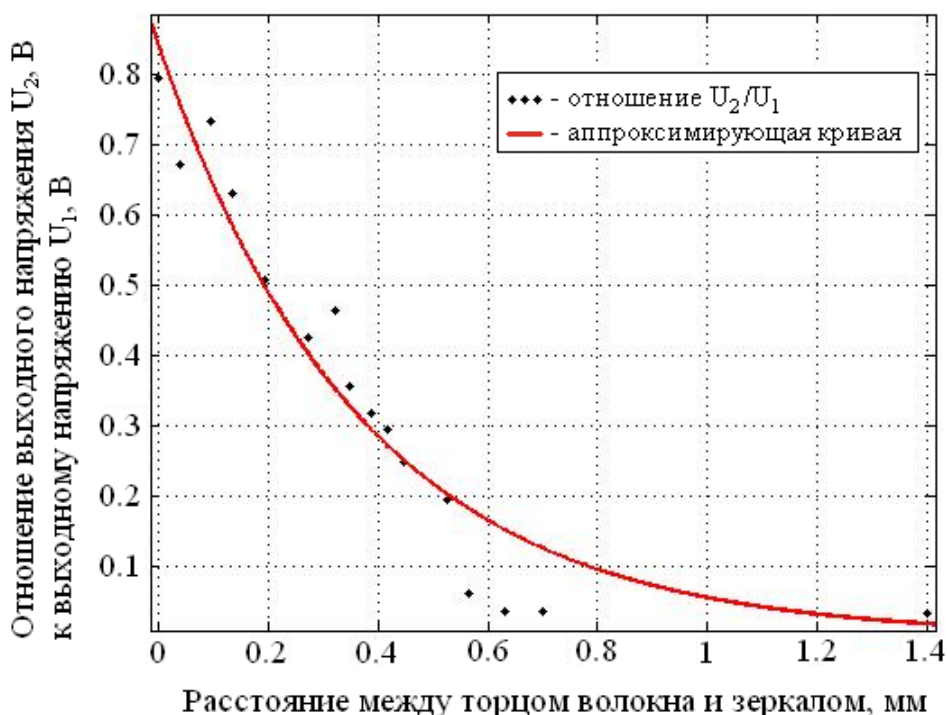


Рисунок 87 – Зависимость отношения U_2/U_1 от расстояния между торцом волокна и зеркалом x_0

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{P_2 / S}{P_1 / S} = \frac{P_2}{P_1}. \quad (70)$$

Зная, что мощность P , Вт – это произведение выходного напряжения U , В и тока I_ϕ , мА (формула(71)) и учитывая формулу (68), отношение интенсивности второго канала I_2 , Вт/м² к интенсивности первого канала I_1 , Вт/м² можно определить по формуле (71). В таблице 12 приведены результаты расчета отношения выходных интенсивностей.

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 \cdot I_2}{U_1 \cdot I_1} = \frac{U_2 \cdot \frac{U_2}{R_1}}{U_1 \cdot \frac{U_1}{R_1}} = \frac{U_2^2}{U_1^2} = \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2. \quad (71)$$

Таблица 12 – Результаты измерения

Поворот винта, градусы	Смещение x_0 , мм	Выходное напряжение первого канала U_1 , В	Выходное напряжение второго канала U_2 , В	Отношение выходного напряжения второго канала к выходному напряжению первого канала U_2/U_1	Отношение интенсивности второго канала к интенсивности первого канала I_2/I_1
15	0	6.828	5.422	0.794	0.6305
20	0.039	6.948	4.677	0.673	0.4531
50	0.097	6.681	4.904	0.734	0.5389
70	0.136	6.740	4.262	0.632	0.3999
100	0.194	6.731	3.411	0.507	0.2569
140	0.272	6.696	2.857	0.427	0.1821
165	0.321	6.777	3.154	0.465	0.2166
180	0.350	6.867	2.454	0.357	0.1277
200	0.389	6.841	2.181	0.319	0.1017
215	0.418	6.766	2.004	0.296	0.0877
230	0.447	6.827	1.709	0.250	0.0627
270	0.525	6.976	1.370	0.196	0.0386
290	0.564	6.817	0.432	0.063	0.0040
325	0.632	6.964	0.251	0.036	0.0013
360	0.700	6.796	0.249	0.037	0.0013
720	1.400	6.768	0.228	0.034	0.0011

На рисунке 88 построены график зависимости отношения интенсивности второго канала I_2 , Вт/м² к интенсивности первого канала I_1 , Вт/м² от расстояния между торцом волокна и зеркалом x_0 , мм и ее аппроксимирующая кривая. По ней хорошо видно, что при увеличении

расстояния x_0 от 0 до 0,564 мм (таблица 12) отношение I_2/I_1 уменьшается примерно в 157 раз. Данное снижение обусловлено угловой расходимостью выходящего света (это свойство уже было отражено на рисунке 63). Кроме этого по графику видно, что верхний предел измерения составляет порядка 0,6 мм, так как при дальнейшем увеличении расстояния между зеркалом и торцом волокна выходная интенсивность I_2 не изменяется.

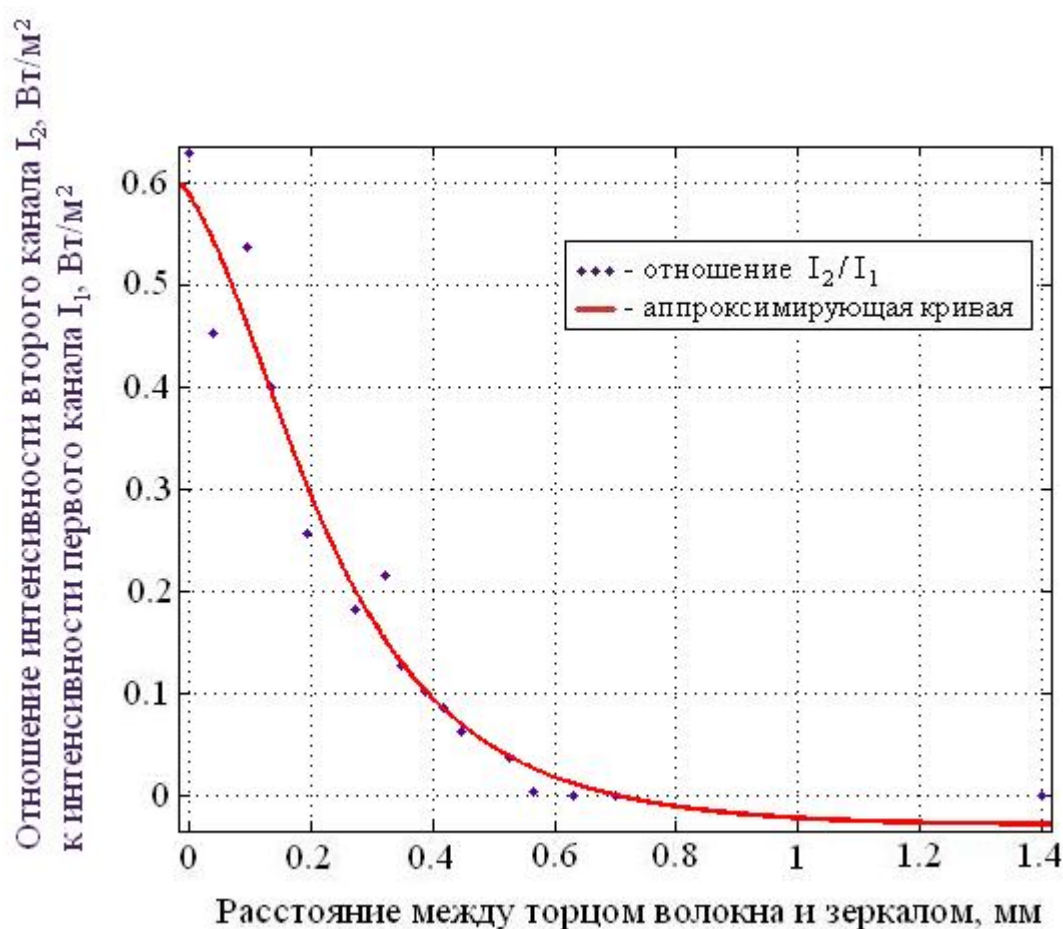


Рисунок 88 – Зависимость отношения интенсивности второго канала I_2 , Вт/м² к интенсивности первого канала I_1 , Вт/м² от расстояния между торцом волокна и зеркалом x_0

Как было сказано ранее, изменение отношения интенсивностей I_2/I_1 должно иметь колебательный характер (рисунки 56 и 63). Однако из-за несовершенств механической части передвижения зеркала (механической подсистемы) и электрической схемы включения фотодиодов установка не позволяет прецизионно осуществлять малые перемещения зеркала и сдвигать

его на доли микрона. Поэтому в результате была получена аппроксимирующая кривая, приближенно описывающая поведение устройства при сдвиге зеркала.

Анализ графика (рисунок 88) показывает, что диапазон измерения составляет от 0 до 0,6 мм. Выходное напряжение датчика зависит от двух основных влияющих факторов. Во-первых, изменения интенсивности за счет смещения интерференционных полос. Во-вторых, изменения интенсивности за счет угловой расходимости света. Угловая расходимость света влияет на центральную тенденцию (красная кривая на рисунке 88), а смещение интерференционных полос отвечает за колебания относительно центральной тенденции (точки на рисунке 88). Видно, что разрешающая способность прибора не позволяет регистрировать перемещения порядка ширины интерференционной полосы. Это обусловлено невысоким технологическим уровнем механической части передвижения зеркала. Совершенствование конструкции позволит преодолеть данный недостаток.

На рисунке 88 наблюдается почти линейная зависимость изменения интенсивности от угловой расходимости света в диапазоне от 0 до 0.3 мм. Погрешность определения перемещения Δx зависит от отношения изменения интенсивности за счет смещения интерференционных полос к изменению интенсивности за счет угловой расходимости света на единицу длины.

$$\Delta x = \Delta I_{\text{сш}} / \Delta I_{\text{урс}}$$

Здесь $\Delta I_{\text{сш}}$ – изменение интенсивности за счет смещения интерференционных полос на единицу длины, $\Delta I_{\text{урс}}$ – изменение интенсивности за счет угловой расходимости света на единицу длины. Оценка погрешности из рисунка 88 дает значение $\Delta x = 50$ мкм.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Цель раздела – комплексное описание и анализ финансово-экономических аспектов выполненной работы. Необходимо оценить полные денежные затраты на исследование (проект), а также дать хотя бы приближенную экономическую оценку результатов ее внедрения.

4.1 Организация и планирование работ

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо рационально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ.

В данном пункте составляется полный перечень проводимых работ, определяются их исполнители и рациональная продолжительность. Наглядным результатом планирования работ является сетевой, либо линейный график реализации проекта. Так как число исполнителей не превышает двух (НР – научный руководитель, И – инженер) в большинстве случаев предпочтительным является линейный график. Для его построения хронологически упорядоченные вышеуказанные данные сведены в таблицу 13.

Таблица 13 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

№	Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
1	Постановка целей и задач	НР	НР – 100%
2	Получение задания	НР, И	НР – 100% И – 50%
3	Составление плана работ	НР, И	НР – 30% И – 100%
4	Изучение принципа работы интерферометра Фабри-Перо	НР, И	НР – 20% И – 100%
5	Изучение видов источников оптического излучения	НР, И	НР – 20% И – 100%
6	Изучение видов фотодетекторов	НР, И	НР – 20% И – 100%
7	Изучение видов оптоволоконна, волоконно-оптических разветвителей, оптических соединителей и их типов разъемов	НР, И	НР – 20% И – 100%
8	Изучение причин потерь, ослабления сигнала в оптическом волокне. Рассмотрение видов дисперсии	НР, И	НР – 20% И – 100%

Продолжение таблицы 13

№	Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
9	Определение структурной схемы датчика	НР, И	НР – 100% И – 80%
10	Выбор метода эталонирования	НР, И	НР – 100% И – 80%
11	Выбор источника и приемника оптического излучения, среды перемещения света (оптоволокна)	НР, И	НР – 80% И – 100%
12	Выбор схемы включения фотодиода	НР, И	НР – 100% И – 80%
13	Конструирование макета датчика	НР, И	НР – 100% И – 80%
14	Проведение опыта	НР, И	НР – 100% И – 80%
15	Наладка модели датчика	НР, И	НР – 100% И – 80%
16	Анализ полученных результатов	НР, И	НР – 100% И – 90%
17	Подведение итогов работы	НР, И	НР – 100% И – 90%
18	Оформление работы	НР, И	НР – 50% И – 100%
19	Сдача готового проекта	И	И – 100%

4.1.1 Продолжительность этапов работ

Для расчета затрат на оплату труда на этапе проектирования необходимо сначала определить продолжительность каждой работы (начиная с постановки цели и задач и до оформления и сдачи документации включительно). Продолжительность работ ($t_{ож}$) определяется расчетом с помощью экспертных оценок по формуле (72).

$$t_{ож} = \frac{3t_{\min} + 2t_{\max}}{5}, \quad (72)$$

где t_{\min} – минимальная продолжительность работ, дн.;

t_{\max} – максимальная продолжительность работ, дн.

Для выполнения перечисленных в таблице 12 работ требуются специалисты:

- инженер (И) – в его роли действует исполнитель НИР (ВКР);
- научный руководитель (НР).

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести ее в календарные дни. Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях (T_{PD}) ведется по формуле (73).

$$T_{PD} = \frac{t_{ож}}{K_{BH}} \cdot K_D, \quad (73)$$

где $t_{ож}$ – продолжительность работы, дн.;

K_{BH} – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, (принимая $K_{BH} = 1$);

K_D – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ ($K_D = 1,2$).

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле (74).

$$T_{KD} = T_{PD} \cdot T_K, \quad (74)$$

где T_{KD} – продолжительность выполнения этапа в календарных днях;

T_K – коэффициент календарности, позволяющий перейти от длительности работ в рабочих днях к их аналогам в календарных днях, и рассчитываемый по формуле (75).

$$T_K = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}}, \quad (75)$$

где $T_{КАЛ}$ – календарные дни ($T_{КАЛ} = 365$);

$T_{ВД}$ – выходные дни ($T_{ВД} = 52$);

$T_{ПД}$ – праздничные дни ($T_{ПД} = 10$).

Тогда для шестидневной рабочей недели коэффициент T_K определяется по формуле (76).

$$T_K = \frac{365}{365 - 52 - 10} = 1,205. \quad (76)$$

В таблице 14 приведены расчеты определения продолжительности этапов работ и их трудоемкости по исполнителям, занятым на каждом этапе. В

столбцах (3–5) реализован экспертный способ определения продолжительности этапов работ (формулы указаны выше). Столбцы 6 и 7 содержат величины трудоемкости этапа для каждого из двух участников проекта (научного руководителя и инженера) с учетом коэффициента $K_d = 1,2$. Каждое из них в отдельности не может превышать соответствующее значение $t_{ож} * K_d$. Столбцы 8 и 9 содержат те же трудоемкости, выраженные в календарных днях путем дополнительного умножения на T_k (здесь оно равно 1,205). Итог по столбцу 5 дает общую ожидаемую продолжительность работы над проектом в рабочих днях, итоги по столбцам 8 и 9 – общие трудоемкости для каждого из участников проекта. Две последних величины далее будут использованы для определения затрат на оплату труда участников и прочие затраты. Величины трудоемкости этапов по исполнителям $T_{кд}$ (данные столбцов 8 и 9 кроме итогов) позволяют построить линейный график осуществления проекта, представленный в таблице 15.

4.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта

В состав затрат на создание проекта включается величина всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости ее выполнения производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без освещения);
- амортизационные отчисления;
- прочие (накладные расходы) расходы.

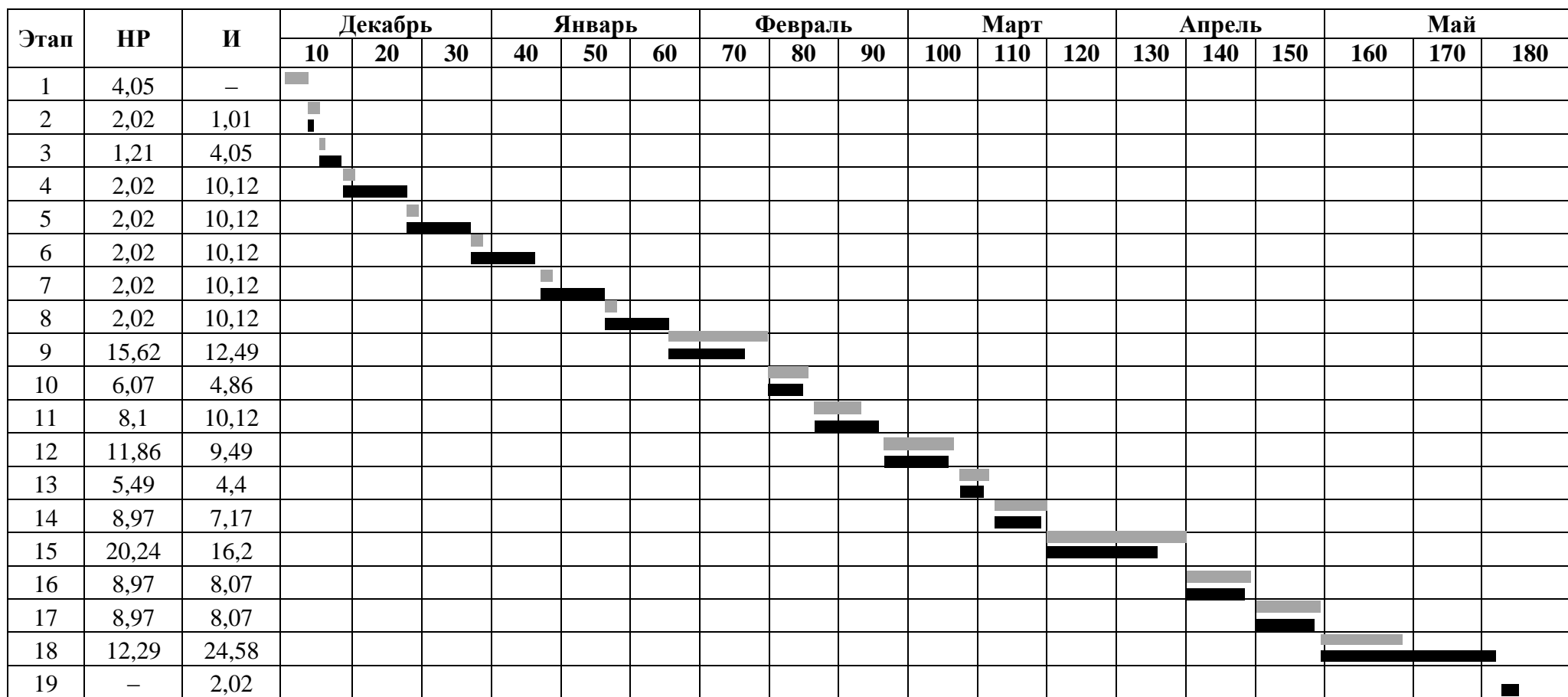
Таблица 14 – Трудозатраты на выполнение проекта

№	Этап	Исполнители	Продолжительность работ			Трудоемкость работ по исполнителям чел.-дн.			
			t _{min}	t _{max}	t _{ож}	Т _{рд}		Т _{кд}	
						НР	И	НР	И
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Постановка целей и задач	НР	2	4	2,8	3,36	–	4,05	–
2	Получение задания	НР, И	1	2	1,4	1,68	0,84	2,02	1,01
3	Составление плана работ	НР, И	2	4	2,8	1,01	3,36	1,21	4,05
4	Изучение принципа работы интерферометра Фабри-Перо	НР, И	5	10	7	1,68	8,40	2,02	10,12
5	Изучение видов источников оптического излучения	НР, И	5	10	7	1,68	8,40	2,02	10,12
6	Изучение видов фотодетекторов	НР, И	5	10	7	1,68	8,40	2,02	10,12
7	Изучение видов оптоволокну, волоконно-оптических разветвителей, оптических соединителей и их типов разъемов	НР, И	5	10	7	1,68	8,40	2,02	10,12
8	Изучение причин потерь, ослабления сигнала в оптическом волокне. Рассмотрение видов дисперсии	НР, И	5	10	7	1,68	8,40	2,02	10,12
9	Определение структурной схемы датчика	НР, И	8	15	10,8	12,96	10,37	15,62	12,49

Продолжение таблицы 14

№	Этап	Исполнители	Продолжительность работ			Трудоемкость работ по исполнителям чел.-дн.			
			t _{min}	t _{max}	t _{ож}	Т _{рд}		Т _{кд}	
						НР	И	НР	И
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	Выбор метода эталонирования	НР, И	3	6	4,2	5,04	4,03	6,07	4,86
11	Выбор источника и приемника оптического излучения, среды перемещения света (оптоволокна)	НР, И	5	10	7	6,72	8,40	8,10	10,12
12	Выбор схемы включения фотодиода	НР, И	7	10	8,2	9,84	7,87	11,86	9,49
13	Конструирование макета датчика	НР, И	3	5	3,8	4,56	3,65	5,49	4,40
14	Проведение опытов	НР, И	5	8	6,2	7,44	5,95	8,97	7,17
15	Отладка модели датчика	НР, И	10	20	14	16,80	13,44	20,24	16,20
16	Анализ полученных результатов	НР, И	5	8	6,2	7,44	6,70	8,97	8,07
17	Подведение итогов работы	НР, И	5	8	6,2	7,44	6,70	8,97	8,07
18	Оформление работы	НР, И	15	20	17	10,20	20,40	12,29	24,58
19	Сдача готового проекта	И	1	2	1,4	–	1,68	–	2,02
Итого:					132,00	108,89	142,38	131,98	172,14

Таблица 15 – Линейный график работ



НР – ■ И – ■

4.2.1 Расчет затрат на материалы

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. Сюда же относятся специально приобретенное оборудование, инструменты и прочие объекты, относимые к основным средствам, стоимостью до 40 000 руб. включительно. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценникам или договорам поставки. Кроме того, статья включает так называемые транспортно-заготовительные расходы (ТЗР), связанные с транспортировкой от поставщика к потребителю, хранением и прочими процессами, обеспечивающими движение (доставку) материальных ресурсов от поставщиков к потребителю. Сюда же включаются расходы на совершение сделки купли-продажи (т.н. транзакции). Результаты расчета затрат на материалы приведены в таблице 16.

Таблица 16 – Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Бумага для принтера формата А4	190	1 уп.	190
Картридж для принтера	1550	1 шт.	1550
Оптический сплавной разветвитель (сплитер) 1x2, 50x50, 1310/1550, SM, 3 мм. оконцованный FC/UPC	590	1 шт.	590
Оптический сплавной разветвитель (сплитер) 1x2, 5x95, 1310/1550, SM, 3 мм. оконцованный FC/UPC	590	2 шт.	1180
Адаптер FC SM D-типа	20	6 шт.	120
Фотодиод ФД-3А	18	4 шт.	72
Зеркало стоматологическое	75	2 шт.	150
Источник лазерного излучения FHS1D02	11000	1 шт.	11000
Усилитель AD795JRZ	453,5	2 шт.	907
Резистор MF-1 10.0K 1% =C2-23 имп.	4	4 шт.	16
Резистор MF-1 1.1K 1% =C2-23 имп.	4	3 шт.	12
Резистор P1-32-0,5-100 МОм 5%	33	3 шт.	99
Конденсатор NP0 10pF 50V 5% = K10-17Б имп.	0,8	4 шт.	3,2
Плата переходник SOIC-8 и SSOP-8	20	2 шт.	40
Плата макетная PCB 60 мм x 80 мм	200	1 шт.	200
Флюс ЛТИ-120	55	1 шт.	55
Итого:			16184,2

Допустим, что ТЗР составляют 5 % от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны $C_{\text{мат}} = 16184,2 * 1,05 = 16993,41$ руб.

4.2.2 Расчет заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера (в его роли выступает исполнитель проекта), а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя. Величина месячного оклада НР равна 23264,86 руб. Оклад инженера принимается равным окладу соответствующего специалиста низшей квалификации в организации, который равен 7864,11 руб.

Среднедневная тарифная заработная плата ($ЗП_{\text{дн-т}}$) рассчитывается по формуле (77), учитывающей, что в году 298 рабочих дней и, следовательно, в месяце в среднем 24,83 рабочих дня (при шестидневной рабочей неделе).

$$ЗП_{\text{дн-т}} = MO / 24,83, \quad (77)$$

Расчеты затрат на полную заработную плату приведены в таблице 16. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из таблицы 13. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов: $K_{\text{пр}} = 1,1$; $K_{\text{доп.ЗП}} = 1,188$; $K_{\text{р}} = 1,3$. Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент $K_{\text{и}} = 1,1 * 1,188 * 1,3 = 1,699$. Вышеуказанное значение $K_{\text{доп.ЗП}}$ применяется при шестидневной рабочей неделе.

Таблица 17 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	23264,86	936,97	109	1,699	173517,63
И	7864,11	316,72	143	1,699	73370,91
Итого:					250466,50

4.2.3 Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30 % от полной заработной платы по проекту, т.е. $C_{\text{соц.}} = C_{\text{зп}} \cdot 0,3$.
Итак, в нашем случае $C_{\text{соц.}} = 250466,50 \cdot 0,3 = 75139,95$ руб.

4.2.4 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию, потраченную в ходе выполнения проекта на работу используемого оборудования, рассчитываемые по формуле (78).

$$C_{\text{эл.об}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot Ц_{\text{э}}, \quad (78)$$

где $P_{\text{об}}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$Ц_{\text{э}}$ – тариф на 1 кВт·час (для ТПУ $Ц_{\text{э}} = 5,257$ руб./кВт·час (с НДС));

$t_{\text{об}}$ – время работы оборудования, час.

Время работы оборудования $t_{\text{об}}$ определяется путем прямого учета.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле (79).

$$P_{\text{об}} = P_{\text{ном}} \cdot K_{\text{с}}, \quad (79)$$

где $P_{\text{ном.}}$ – номинальная мощность оборудования, кВт;

$K_{\text{с}} \leq 1$ – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности. Для технологического оборудования малой мощности $K_{\text{с}} = 1$.

Расчет затрат на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 18.

Таблица 18 – Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{об}$, час	Потребляемая мощность $P_{об}$, кВт	Затраты $C_{эл. об}$, руб.
Персональный компьютер	720	0,3	1135,51
Струйный принтер	2	0,1	1,05
Паяльник	5	0,03	0,79
Осциллограф	10	0,03	1,58
Итого:			1138,93

4.2.5 Расчет амортизационных расходов

В статье «Амортизационные отчисления» рассчитывается амортизация используемого оборудования за время выполнения проекта.

Используется формула (80).

$$C_{AM} = \frac{H_A \cdot C_{об} \cdot t_{рф} \cdot n}{F_d}, \quad (80)$$

где H_A – годовая норма амортизации единицы оборудования;

$C_{об}$ – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР. При невозможности получить соответствующие данные из бухгалтерии она может быть заменена действующей ценой, содержащейся в ценниках, прейскурантах и т.п.;

F_d – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году. При этом второй вариант позволяет получить более объективную оценку C_{AM} . Например, для ПК в 2015 г. (298 рабочих дней при шестидневной рабочей неделе) можно принять $F_d = 298 \cdot 8 = 2384$ часа;

$t_{рф}$ – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта;

n – число задействованных однотипных единиц оборудования.

При использовании нескольких типов оборудования расчет по формуле делается соответствующее число раз, затем результаты суммируются. Расчет величины амортизационных отчислений приведен в таблице 19.

Таблица 19 – Величина амортизационных отчислений

Наименование	На	Цоб., руб.	Время работы оборудования $t_{рф}$, час	Количество во n	F_d , час	$C_{ам}$, руб.
Компьютер	0,4	40000	720	1 шт.	2384	4832,2
Струйный принтер	0,5	12000	2	1	500	24
Осциллограф	0,4	80000	42,9	1	2384	575,84
Итого						5432,04

4.2.6 Расчет прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях, их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов, которые рассчитывается по формуле (81).

$$C_{\text{проч.}} = (C_{\text{мат}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{эл.об.}} + C_{\text{ам}}) \cdot 0,1. \quad (81)$$

Для нашего проекта прочие расходы рассчитываются по формуле (82).

$$C_{\text{проч.}} = (16993,41 + 250466,50 + 75139,95 + 1138,93 + 5432,04) \cdot 0,1 = 34917,08 \text{ руб.} \quad (82)$$

4.2.7 Расчет общей себестоимости разработки

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость. Смета затрат представлена в таблице 20.

Таблица 20 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	16993,41
Основная заработная плата	$C_{\text{зп}}$	250466,50
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	75139,95
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{эл.об}}$	1138,93
Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам}}$	5432,04
Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	34917,08
Итого:		384087,91

Таким образом, затраты на разработку составили $C = 384087,91$ руб.

4.2.8 Расчет прибыли

Прибыль от реализации разработанного оптоволоконного датчика малых перемещений предполагается равной 10 % от расходов на разработку проекта и составляет 38408,791 руб.

4.2.9 Расчет налога на добавленную стоимость (НДС)

НДС составляет 18% от суммы затрат на разработку и прибыли. В нашем случае рассчитывается по формуле (83).

$$(384087,91 + 38408,791) * 0,18 = 422496,701 * 0,18 = 76049,41 \text{ руб.} \quad (83)$$

4.2.10 Цена разработки НИР

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС, в нашем случае рассчитывается по формуле (84).

$$C_{\text{НИР(КР)}} = 384087,91 + 38408,791 + 76049,41 = 498546,11 \text{ руб.} \quad (84)$$

4.3 Оценка экономической эффективности проекта

Актуальным аспектом качества выполненного проекта является экономическая эффективность его реализации, которая выражается в соотношении обусловленного ею экономического результата и затрат на разработку проекта. В рассматриваемой ситуации оценивается экономическая эффективность инвестиций, то есть вложений денежных средств в проект с целью получения определенного экономического эффекта в будущем.

Цель проекта состоит в изучении волоконно-оптического интерферометра Фабри–Перо, как способа измерения малых перемещений, и проектировании макетного образца. Примерами данного вида измерения являются контроль деформации, точность механической обработки, контроль деталей с малой поверхностной прочностью, точное позиционирование. В то же

время, сила, давление, ускорение, температура и др. измеряются с помощью их преобразования в малые перемещения, которые они вызывают в образцах.

Таким образом, оценка экономической эффективности данного проекта некорректна, так как конкретная сфера применения полученного макета датчика малых перемещений на данном этапе исследования не определена.

5 Социальная ответственность

В данном разделе рассматривается описание рабочей зоны предназначенной для выполнения ВКР. Основная часть деятельности связана с работой на персональном компьютере (ПК), лазером и пайкой паяльником. Далее будут рассмотрены связанные с ними требования к организации рабочих мест, возможным выбросам, пожарной безопасности и другие требования.

5.1 Требования при работе на ПК

Существуют правила и нормы работы за компьютером, несоблюдение которых может неблагоприятно сказаться на здоровье человека и привести к появлению ряда заболеваний. Примерами вредных факторов являются:

- длительное неизменное положение тела;
- длительное напряжение глаз;
- длительное воздействие шума;
- воздействие электромагнитных полей;
- воздействие электростатических полей;
- и др.

5.1.1 Требования к микроклимату, содержанию аэроионов

Большое значение для обслуживающего персонала и правильной эксплуатации вычислительной техники имеет соблюдение параметров микроклимата на рабочем месте.

В помещении, где осуществлялась работа на ПК, должны соблюдаться оптимальные параметры микроклимата. При этом, в холодное время года (+10 °С и ниже) температура воздуха должна быть в диапазоне от 22 °С до 24 °С, температура поверхностей – 21 °С до 25 °С. В теплый период (+10 °С и выше) температура воздуха должна быть в диапазоне от 23 °С до 25 °С, температура поверхностей – 22 °С до 26 °С. Для обоих периодов относительная влажность воздуха должна находиться в диапазоне от 40 % до 60 %, скорость движения воздуха – 0,1 м/с [32].

Для обеспечения допустимого уровня влажности могут применяться осушители (в случае повышенной влажности) или увлажнители воздуха (в случае пониженной влажности).

В случае если температура воздуха на рабочих местах отклоняется от вышеуказанных и ее невозможно урегулировать при помощи системы кондиционирования, отопительных систем, то время пребывания на рабочем месте должно быть снижено до указанных в таблицах 21 и 22 значений.

Таблица 21 – Продолжительность работы при температуре воздуха на рабочем месте выше допустимых величин (рекомендуемое)

Температура воздуха на рабочем месте, °C	Время пребывания не более, ч
32,5	1
32,0	2
31,5	2,5
31,0	3
30,5	4
30,0	5
29,5	5,5
29,0	6
28,5	7
28,0	8

Таблица 22 – Продолжительность работы при температуре воздуха на рабочем месте выше допустимых величин (рекомендуемое)

Температура воздуха на рабочем месте, °C	Время пребывания не более, ч
13	1
14	2
15	3
16	4
17	5
18	6
19	7
20	8

Если показатели микроклимата невозможно довести до уровня допустимых, то рабочие места должны рассматриваться как вредные.

Уровни положительных и отрицательных аэроионов в воздухе помещений ПК должны соответствовать нормам, приведенным в таблице 23 [33].

Таблица 23 – Уровни ионизации воздуха помещений при работе на ПК

Уровни	Число ионов в 1 см ³ воздуха	
	n+	n-
Минимально необходимые	400	600
Оптимальные	1500-3000	3000-5000
Максимально допустимые	50000	50000

В результате проведенных на рабочем месте измерений температуры и влажности, было установлено, что в холодное и теплое время года температура и влажность не выходят за установленные пределы. Данные о скорости движения воздуха и о содержании аэроионов в воздухе не были предоставлены.

5.1.3 Производственное освещение

Одной из причин ухудшения состояния здоровья у операторов компьютеров является низкое качество мониторов. Важным мероприятием по защите от излучений является оптимальная расстановка компьютеров в рабочем помещении. При этом рабочие столы должны быть размещены таким образом, чтобы свет падал преимущественно слева.

В помещениях должно быть смешанное (естественное и искусственное) освещение. Естественное освещение в помещении осуществляется через световые проемы.

Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300-500 лк. Допускается установка светильников местного освещения для подсветки документов. Местное освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана и увеличивать освещенность экрана более 300 лк.

Общее освещение при использовании люминесцентных светильников следует выполнять в виде сплошных или прерывистых линий светильников, расположенных сбоку от рабочих мест, параллельно линии зрения пользователя при рядном расположении ПК. При периметральном расположении компьютеров линии светильников должны располагаться локализованно над рабочим столом ближе к его переднему краю, обращенному к оператору.

Коэффициент пульсации не должен превышать 5 %, что должно обеспечиваться применением газоразрядных ламп в светильниках общего и местного освещения [34].

В результате проведенной проверки соответствия требованиям освещенности было установлено, что в помещении освещение смешанное. При этом стол расположен таким образом, что естественный свет падает слева. Также рабочее место оборудовано дополнительным светильником местного освещения. Общее освещение осуществляется с использованием люминесцентных светильников, выполненных в виде прерывистых линий. Однако следует отметить, что коэффициент пульсации у люминесцентных ламп намного превышает предельно допустимое значение. В светильнике местного освещения используется лампа накаливания, коэффициент пульсации которой удовлетворяет поставленным требованиям. Данные об освещенности рабочей зоны не были предоставлены.

5.1.4 Требования к уровню шума

Источниками шума, в основном, являются подвижные части печатающих устройств и дисководов, работающие кулеры, шум на улице.

При выполнении основной работы на ПК уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБА [35].

Данные об уровне шума рабочей зоны не были предоставлены. Для снижения воздействия шума, исходящего снаружи, в рабочем помещении были установлены пластиковые окна. За счет нескольких слоев стекла, такие окна обладают хорошей звукоизоляцией. Например, окна с однокамерным стеклопакетом способны снизить уровень шума на 30–35 дБ, а окна с двухкамерным пакетом снижают шум на 40 дБ [36].

5.1.5 Электромагнитные излучения

Безопасные уровни электромагнитных полей (ЭМП), создаваемых ПК на рабочем месте, регламентируются нормами СанПиН 2.2.2-2.4.1340. В таблице 24 показаны допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПК на рабочих местах.

Таблица 24 – Временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПК на рабочих местах

Наименование параметров		ВДУ
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м

Для обеспечения нормальной электромагнитной обстановки в рабочем помещении необходимо обеспечить надежное заземление (с периодическим контролем) системного блока и источника питания ПК.

Данные об уровне ЭМП рабочей зоны не были предоставлены. Системный блок заземлен через заземляющий контакт трехконтактной вилки питания.

5.1.6 Требования к организации рабочего места

В соответствии с СанПиН 2.2.2-2.4.1340 организация рабочего места пользователя ПК должна осуществляться в соответствии со следующими требованиями:

- расстояние между боковыми поверхностями видеомониторов должно быть не менее 1,2 м;
- экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии от 600 до 700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов.
- конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение используемого оборудования с учетом характера выполняемой работы;
- поверхность рабочего стола должна иметь коэффициент отражения от 0,5 до 0,7;
- конструкция рабочего стула должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПК, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и

спины; тип рабочего стула выбирается с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ПК.

Высота рабочей поверхности стола регулируется в пределах 680–800 мм.

Модульными размерами рабочей поверхности стола для ПЭВМ, на основании которых должны рассчитываться конструктивные размеры, следует считать: ширину от 800 мм, глубину от 800 мм.

Рабочий стол должен иметь пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной - не менее 500 мм, глубиной на уровне колен - не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног - не менее 650 мм.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100 - 300 мм от края, обращенного к пользователю или на специальной, регулируемой по высоте рабочей поверхности, отделенной от основной столешницы [34].

Значения нормируемых параметров для рассматриваемого рабочего места представлены в таблице 25.

Таблица 25 – Нормируемые параметры рассматриваемого рабочего места

Наименование параметра	Значение параметра
Расстояние между боковыми поверхностями видеомониторов	2 м
Расстояние от глаз пользователя до экрана монитора	700 мм
Высота рабочей поверхности стола	700 мм
Ширина стола	1200 мм
Глубина стола	800 мм
Высота пространства для ног	698 мм
Ширина пространства для ног	600 мм
Глубина пространства для ног	700 мм
Расстояние до клавиатуры	150 мм

По таблице 25 можно сделать вывод, что рабочее место соответствует требованиям к его организации.

5.2 Требования охраны труда для работников, занятых пайкой

Требования охраны труда для работников, занятых пайкой изложены в ТИ Р М-075-2003.

При пайке паяльником на работника могут воздействовать опасные и вредные производственные факторы:

- повышенная загазованность воздуха рабочей зоны парами вредных химических веществ;
- повышенная температура поверхности изделия, оборудования, инструмента и расплавов припоев;
- повышенная температура воздуха рабочей зоны;
- пожароопасность;
- брызги припоев и флюсов;
- повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело работника.

Для уменьшения воздействия вредных факторов применяются средства индивидуальной защиты (СИЗ). Нанесение припоев и флюсов должно проводиться при действующей общеобменной или местной вытяжной вентиляции.

Кабель паяльника должен быть защищен от случайного механического повреждения и соприкосновения с горячими деталями.

Для местного освещения рабочих мест при пайке паяльником должны применяться светильники с непросвечивающими отражателями. Светильники должны располагаться таким образом, чтобы их светящие элементы не попадали в поле зрения работников.

Для предупреждения работников о возможности поражения электрическим током на полу участка пайки паяльником должны быть положены деревянные решетки, покрытые диэлектрическими ковриками.

Работник, занятый пайкой паяльником, обязан немедленно извещать своего непосредственного или вышестоящего руководителя о любых ситуациях, угрожающих жизни и здоровью людей, о каждом несчастном случае, происшедшем на производстве, или об ухудшении состояния своего здоровья, в том числе о проявлении признаков острого профессионального заболевания (отравления).

Работник, занятый пайкой паяльником, обязан соблюдать правила личной гигиены: перед приемом пищи и после окончания работы вымыть руки теплой водой с мылом. Пищу необходимо принимать в специально оборудованных для этой цели помещениях.

5.3 Эксплуатация лазеров

Интенсивность излучения лазеров оценивается по величине энергии или мощности в пучке и выражается в джоулях или ваттах.

Результат воздействия лазерного излучения на органы, ткани и организм в целом зависит от длины волны излучения, плотности энергии (мощности) излучения, длительности и частоты импульсов, времени воздействия, а также от физико-химических и биологических особенностей тканей.

В зависимости от степени опасности генерируемого излучения лазеры подразделяются на 4 класса.

Выбранный источник лазерного излучения Grandway FHS1D02 относится ко второму классу. Его выходное излучение представляет опасность при облучении глаз прямым или зеркально-отраженным излучением [37].

Попадание в орган зрения прямого или зеркально отраженного лазерного излучения достаточной мощности с длиной волны в видимой или ближней инфракрасной области спектра (длина волны излучения от 0,74 до 2,5 мкм) может проявляться внезапным выпадением части поля зрения (развитием скотомы) без каких-либо болевых ощущений. Офтальмологически в таких случаях обнаруживаются различной степени выраженности ожоги сетчатки, кровоизлияния в сетчатку с последующим образованием хориоретинального рубца и снижением остроты зрения.

Пучок излучения данного класса лазера ограничивается на конце своей полезной траектории поглотителем. Конструкция оптоволоконного датчика разработана таким образом, что торец волокна помещен в герметичный темный контейнер, исключающий проникновение излучения наружу.

Запрещается:

- осуществлять наблюдение прямого и зеркально отраженного лазерного излучения при эксплуатации лазеров;
- размещать в зоне лазерного луча блестящие предметы, способные вызвать его зеркальное отражение, если это не связано с производственной необходимостью.

В случае подозрения или очевидного облучения глаз лазерным излучением следует немедленно обратиться к врачу для специального обследования.

В ходе работы с разрабатываемым оптоволоконным датчиком вероятность попадания лазерного излучения на кожу и в глаза минимальна, так как система излучения закрытая. Наблюдение прямого или зеркально отраженного лазерного излучения не проводилось.

5.4 Требования охраны труда в аварийных ситуациях

При обнаружении неисправной работы паяльника отключить его от питающей электросети и известить об этом своего непосредственного или вышестоящего руководителя.

При травмировании, отравлении и внезапном заболевании работника оказать ему первую (доврачебную) помощь и, при необходимости, организовать доставку в учреждение здравоохранения.

При возникновении пожара:

- прекратить работу;
- отключить электрооборудование;
- сообщить непосредственному или вышестоящему руководителю о пожаре;
- сообщить о пожаре в пожарную охрану;
- принять по возможности меры по тушению пожара и сохранности материальных ценностей.

5.5 Требования охраны труда по окончании работы

Отключить от электросети паяльник, пульты питания, освещение.

Неизрасходованные флюсы убрать в вытяжные шкафы или в специально предназначенные для хранения кладовые.

Привести в порядок рабочее место, сложить инструменты и приспособления в инструментальный ящик.

Снять спецодежду и другие средства индивидуальной защиты и повесить их в специально предназначенное место.

Вымыть руки и лицо теплой водой с мылом, при возможности принять душ.

В ходе проведенной проверки было установлено, что помещение оборудовано общеобменной вентиляцией, рабочее место оборудовано дополнительным светильником местного освещения с непросвечивающими отражателями, что соответствует установленным требованиям. Однако на полу диэлектрический коврик отсутствовал. Благодаря соблюдению правил безопасности никаких ситуаций, угрожающих жизни и здоровью, несчастных случаев во время работы не произошло. Правила личной гигиены и требования охраны труда по окончании работы также были соблюдены.

5.6 Электробезопасность

Степень поражения зависит силы тока, протекающего через тело человека, от рода и частоты тока. Наиболее опасным является переменный ток частотой от 20 до 1000 Гц, но это характерно только для напряжений 500 В, при больших напряжениях опасным становится постоянный ток.

При гигиеническом нормировании ГОСТ 12.1.038 – 82 устанавливает предельно допустимые напряжения прикосновения и токи, протекающие через тело человека (рука – рука, нога – нога) при нормальном (неаварийном) режиме работы электроустановок производственного и бытового назначения постоянного и переменного тока частотой 50 и 400 Гц.

Высокий уровень состояния изоляции электроустановок – одно из главных условий их безопасности. Основные характеристики изоляции – сопротивление. Согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ) сопротивление изоляции в электроустановках напряжением до 1000 В должно быть не менее 0,5 МОм. Сопротивление изоляции необходимо регулярно контролировать. Для периодического контроля изоляции применяется мегаомметр, для постоянного контроля – специальные приборы контроля изоляции.

Защитное заземление – это преднамеренное электрическое соединение металлических нетоковедущих частей электроустановок, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции, с землей или её эквивалентом (в соответствии с ГОСТ Р 12.1.019).

Принцип действия защитного заземления заключается в снижении до безопасных значений напряжений прикосновения, вызванных замыканием на корпус. Защитному заземлению подвергают металлические части электроустановок и оборудования, доступные для прикосновения человека и не имеющие других видов защиты.

К основным требованиям, предъявляемым к обеспечению электробезопасности пользователей, работающих на персональных компьютерах, относятся следующие:

- все узлы одного персонального компьютера и подключенное к нему периферийное оборудование должны питаться от одной фазы электросети;
- корпуса системного блока и внешних устройств должны быть заземлены радиально с одной общей точкой;
- для отключения компьютерного оборудования должен использоваться отдельный щит с автоматами защиты и общим рубильником;
- все соединения ПК и внешнего оборудования должны производиться при отключенном электропитании.

В ходе проведенной проверки было установлено, что все части компьютера заземлены. Кроме этого все оборудование включено в сетевой

фильтр, подавляющий помехи и предохраняющий от возможных скачков напряжения в электросети. В помещении имеется электрический щиток, который сохраняет электрические сети от перепадов напряжения и обеспечивает распространение электроэнергии для всего используемого оборудования. После завершения работы все электроприборы отключаются. Все остальные требования так же соблюдены.

5.7 Пожарная и взрывная безопасность

Пожарная и взрывная безопасность – это система организационных мероприятий и технических средств, направленная на профилактику и ликвидацию пожаров и взрывов.

Противопожарная защита обеспечивается:

- применением негорючих и трудно горючих веществ и их размещением;
- изоляцией горючей среды;
- предотвращением распространения пожара за пределы очага;
- применением средств пожаротушения;
- применением конструкции объектов с регламентированными пределами огнестойкости и горючестью;
- эвакуацией людей;
- системами противодымной защиты;
- применением средств пожарной сигнализации;
- организацией пожарной охраны промышленных объектов.

Помещение должно быть оснащено как минимум двумя углекислотными огнетушителями ОУ-3, ОУ-5 предназначенными для тушения загораний веществ, горение которых не может происходить без доступа воздуха, загораний электроустановок, находящихся под напряжением не более 1000В, жидких и газообразных веществ (класс В, С) (в соответствии с Техническим регламентом 123-ФЗ)

На рисунке 88 представлен план эвакуации при пожаре и других ЧС.

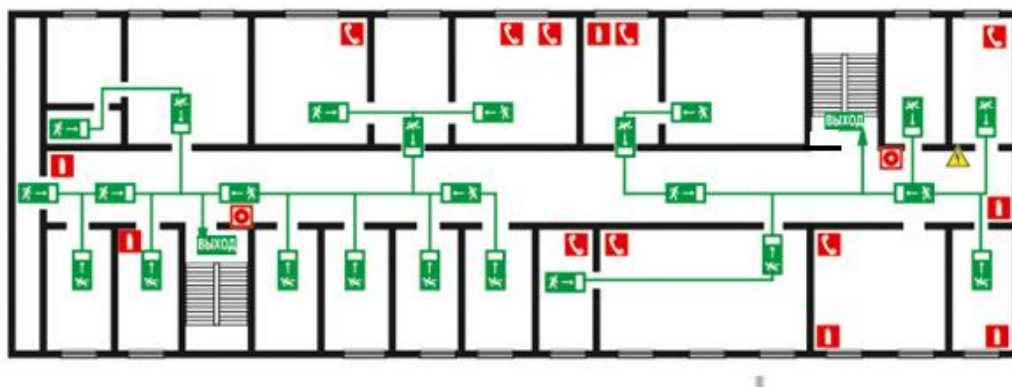








Рисунок 89 – План эвакуации людей (первый этаж)

Условные обозначения:

-  - огнетушитель
-  - кнопка ручного пожарного извещателя
-  - электрошиток
-  - телефон
-  - основной выход
-  - основной путь эвакуации

В ходе проведенной проверки было установлено, что здание, в котором проводилась работа, оснащено средствами пожарной сигнализации (оповещающих людей о возможном пожаре), планом эвакуации и первичными средствами пожаротушения.

5.8 Региональная безопасность

Устройство по приходу в негодность, следует сдать в пункт сбора электрических и электронных устройств, для вторичной переработки. Процесс утилизации электронных устройств проходит в несколько этапов. Специалисты:

- разбирают технику на составные элементы;
- сортируют детали в зависимости от материалов изготовления;
- металл спрессовывают в брикеты для удобства транспортировки и отправляют на повторную переработку;

- пластиковые детали измельчают в крошку, которую используют для производства кирпича, тротуарной плитки и других изделий;
- стекло дробят и в дальнейшем применяют при изготовлении бетона.

На устройстве или его упаковке должен быть символ, указывающий на то, что устройство нельзя утилизировать как бытовые отходы, и оно требует специальной утилизации. Символ представлен на рисунке 89.



Рисунок 90

При производстве и использования ПК персонал должен соблюдаться требования в соответствии Федеральным законом 7-ФЗ. При работе устройство не производит выбросов в атмосферу и не загрязняет окружающую среду.

Заключение

В ходе проделанной работы была построена структурная схема устройства, реализующего измерение малых длин на базе волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо. Для определения необходимых компонентов был проведен обзор существующих источников и приемников оптического излучения, видов оптического волокна, волоконно-оптических разветвителей, соединителей, коннекторов и видов полировки торца оптоволокна.

В соответствии с поставленной целью, в качестве источника оптического излучения был выбран лазерный источник Grandway FHS1D02, в качестве приемника – германиевый фотодиод ФД-3А. В качестве среды распространения света было выбрано одномодовое волокно и два типа сплавных разветвителя с коэффициентами деления 50/50 и 5/95. Каждая часть волокна оконцована соединителем FC-типа. Чтобы обеспечить возможность изменения конструкции устройства, было сделано разъемное соединение оптоволокна при помощи адаптера D-типа для их быстрого соединения и разъединения между собой. Торец волокна имеет тип полировки UPC. Кроме этого был сделан выбор схемы фотодетектора, которая в дальнейшем была оптимизирована для ее корректной работы. Также была сконструирована механическая часть передвижения зеркала (механической подсистемы), в которой передвижение зеркала происходило посредством поворота винта на определенный градус.

Был собран опытный образец устройства и проведены первичные испытания. В результате были получены зависимости изменения интенсивности излучения от величины смещения зеркала. Установлено, что диапазон измерения составляет от 0 до 0,3 мм. Погрешность измерения 50 мкм. Установлено, что основным влияющим фактором на результат измерения является угловая расходимость света за счет перемещения. Влияние сдвига интерференционных полос на результат измерения фиксируется только как

отклонение. Для учета влияния сдвига интерференционных полос необходимо прецизионное исполнение механизма перемещения зеркала.

Список публикаций

- 1 Василевская Е. С., Разработка оптоволоконного датчика перемещения// Молодежи и современные информационные технологии: сборник трудов XII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2 т. Т. 1/ Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2014. – С. 204–205.
- 2 Василевская Е. С., Разработка оптоволоконного датчика перемещения// Современные техника и технологии: сборник трудов XXI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2 т. Т. 1 / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2015. – С. 252–254.

Список использованных источников

- 1 Принципы действия волоконно-оптических датчиков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://5fan.ru/wievjob.php?id=18146>– Загл. с экрана. (дата обращения: 23.01.2015)
- 2 Интерферометры и их применение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ppt4web.ru/fizika/interferometry-i-ikh-primenenie.html>– Загл. с экрана. (дата обращения: 23.01.2015)
- 3 Волоконно-оптический интерферометр Фабри-Перо [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://physics.nad.ru/sensors/Cyrillic/interf.htm> – Загл. с экрана. (дата обращения: 23.01.2015)
- 4 Солоухин Р. И. Оптика и атомная физика. – Изд. 2-е, перераб. и доп.– Новосибирск, Наука, 1983. – 454 с.
- 5 Интерферометр Фабри-перо [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mipt.ru/dppe/upload/540/21-arpf38r8d02.pdf> – Загл. с экрана. (дата обращения: 23.01.2015)
- 6 Бейли Д. Волоконная оптика: теория и практика: пер. с англ. / Д. Бейли, Э. Райт. – М.: КУДИЦ-Образ, 2006. – 320 с.
- 7 Окоси Т. Волоконно-оптические датчики: пер. с яп. / под ред. Т. Окоси. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
- 8 Иванов А. Б. Волоконная оптика – Компоненты, системы передачи, измерения / А. Б. Иванов – М.: Компания «Сайрус системс», 1999. - 663 с.
- 9 Стерлинг Д. Д.. Техническое руководство по волоконной оптике: пер. с англ. / Д. Д. Стерлинг. — Москва: Лори, 1998. – 288 с.
- 10 Компания «Нолатех» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.nolatech.ru/>– Загл. с экрана. (дата обращения: 23.02.2015)
- 11 Миразимов Г. Х. Основы оптической связи: под ред. к.т.н., доцента Р.И. Исаева / Г. Х. Миразимов. – Ташкент, ТУИТ, 2008. – 119 с.
- 12 Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи: пер. с англ. / Р. Фриман. – 4-е доп. изд. – М.: Техносфера, 2007. – 511 с.

- 13 Скляр О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи: учебное пособие / О. К. Скляр. – 2-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2010. – 272 с.
- 14 Цуканов В. Н. Волоконно-оптическая техника: практическое руководство / В. Н. Цуканов, М. Я. Яковлев. – Москва: Инфра-Инженерия, 2014. – 302 с.
- 15 Виды сплиттеров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lantorg.com/article/kak-vybrat-splitter-delitel-dlya-pon> – Загл. с экрана. (дата обращения: 23.05.2015)
- 16 Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети / Р.Р. Убайдуллаев– М.: Эко-трендз, 2000. – 268 с.
- 17 Семенов А. Б. Волоконно-оптические подсистемы современных СКС / А. Б. Семенов. – Москва: ДМК Пресс АйТи, 2007. – 632 с.
- 18 Монтаж волоконно-оптической системы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lantorg.com/article/montazh-vols-opticheskie-razemy> – Загл. с экрана. (дата обращения: 23.05.2015)
- 19 Описание оптических разъемов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zyxel.ru/kb/2236/> – Загл. с экрана. (дата обращения: 23.05.2015)
- 20 Андрушко Л. М. ВОЛС: волоконно-оптические линии связи: справочник / под ред. С. В. Свечникова, Л. М. Андрушко. – Киев: Техника, 1988. – 239 с.
- 21 Бутусов М. М. Волоконная оптика и приборостроение / под ред. М. М. Бутусова. – Ленинград: Машиностроение, 1987. – 328 с.
- 22 Бейли Д. Волоконная оптика. Теория и практика: пер. с англ. / Д. Бейли, Э. Райт. – Москва: Кудиц-Пресс, 2008. – 320 с.
- 23 Гауэр Дж. Оптические системы связи: пер. с англ. / Дж. Гауэр. – Москва: Радио и связь, 1989. – 504 с.
- 24 Ишанин Г. Г. Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов / Г. Г. Ишанин. – Ленинград: Машиностроение, 1986. – 173 с.
- 25 Мутовин Ю. В. Физические основы электроники: практикум / Ю. В. Мутовин. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2008. – 149 с.

- 26 Лиокумович Л. Б. Волоконно-оптические интерферометрические измерения. Часть 1. Волоконно-оптические интерферометры / Л. Б. Лиокумович. – Спб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 110 с.
- 27 Дашков М. В. Исследование параметров волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо: учебно-методическая разработка / Т.Г. Никулина, М.В. Дашков. – Самара: ИНУЛ ПГУТИ, 2015. – 109 с.
- 28 Джексон Р. Г. Новейшие датчики: пер. с англ. / Р. Г. Джексон. – Москва: Техносфера, 2007. – 380 с.
- 29 Аксененко М. Д. Приемники оптического излучения: справочник / М. Д. Аксененко, М. Л. Бараночников. — Москва: Радио и связь, 1987. – 295 с.
- 30 Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств / Г. И. Волович. — 2-е изд. — Москва: Додэка-XXI, 2007. – 528 с.
- 31 Преобразователь тока в напряжение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://stu.alnam.ru/book_ane.php?id=17 – Загл. с экрана. (дата обращения: 23.09.2015)
- 32 СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Санитарные правила и нормы
- 33 СанПиН 2.2.4.1294-03 Гигиенические требования к аэроионному составу воздуха производственных и общественных помещений
- 34 СанПиН 2.2.2-2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы
- 35 СН 2.2.4/2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки
- 36 Окна для дома [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ktovdome.ru/likbezzz/14399.html> – Загл. с экрана. (дата обращения: 23.10.2015)
- 37 СанПиН 5804-91 Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров

Приложение А
(обязательное)

Раздел 2
Компоненты оптоволоконного датчика

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ41	Василевская Екатерина Сергеевна		

Консультант кафедры КИСМ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. КИСМ	Казаков Вениамин Юрьевич	Канд. физ.- мат. наук		

Консультант – лингвист кафедры ИЯИК :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Шепетовский Денис Владимирович			

2.2 Optical Fiber

The optical fiber restrains the area of optical vibrations propagation and directs a light in a prescribed direction. It connects the signal source with the receiver in the optical fiber systems. The most important property of an optical fiber is its ability to transport light radiation for long distances with very low loss (attenuation) (about 0.2 dB / km at a wavelength of 1550 nm).

The design of the optical fibers (OF) is shown in Figure 17 (core and other elements constituent). The fiber core consists of a core and a cladding surrounding it. Other additional coatings (optical buffers) are designed for protection.

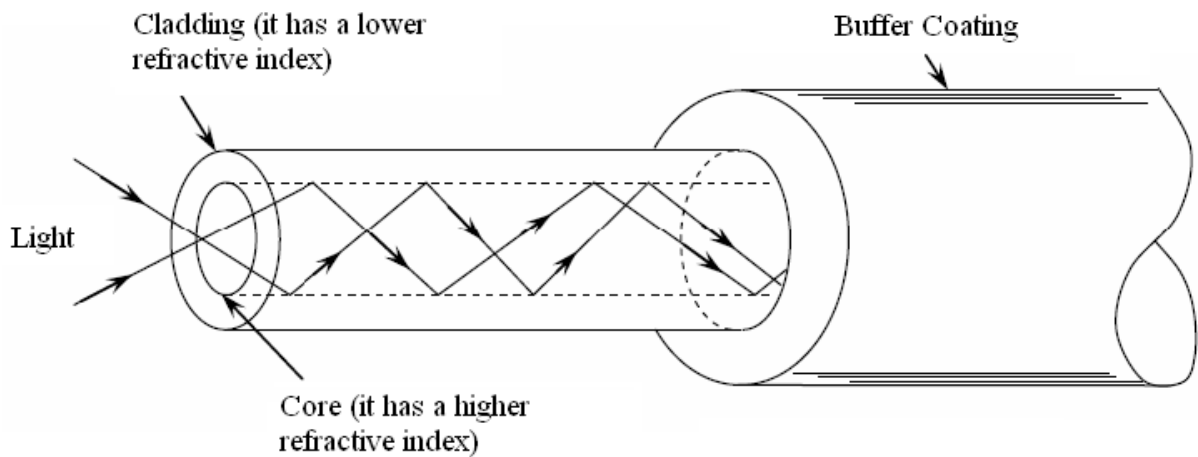


Figure 17 - The basic structure of an optical fiber

Typically, a core refraction index is designated by n_1 , while the cladding refraction index is designated by n_2 . When the core is designed according to rule $n_1 > n_2$, the core-cladding structure acts as a wave guide. Silica glass (SiO_2) is the basic material of the core and cladding. Doping agents (such as boron and germanium) are used to obtain the required values of refraction index [12].

The amount of attenuation in the fiber is one of the factors influencing the choice of the operating frequency (wavelength). Attenuation is a decrease of optical power as light travels along the fiber. It is measured in decibels per kilometer. It ranges from 300 dB/km (for the plastic fiber) to about 0.21 dB/km (for the single-mode fiber).

The attenuation depends on the light wavelength. The losses decrease with increasing wavelength (frequency reduction). Therefore, the fiber-optic

communication typically use infrared light waves. Figure 18 shows the three basic transmission windows characterized by low attenuation in the silica fiber. They are the working wavelengths for fiber optic transmission systems (FOTS):

- 820-900 nm;
- 1280-1350 nm;
- 1528-1561 nm.

The last transmission window may be expanded to 1620 nm (this area is commonly referred to fourth transmission window).

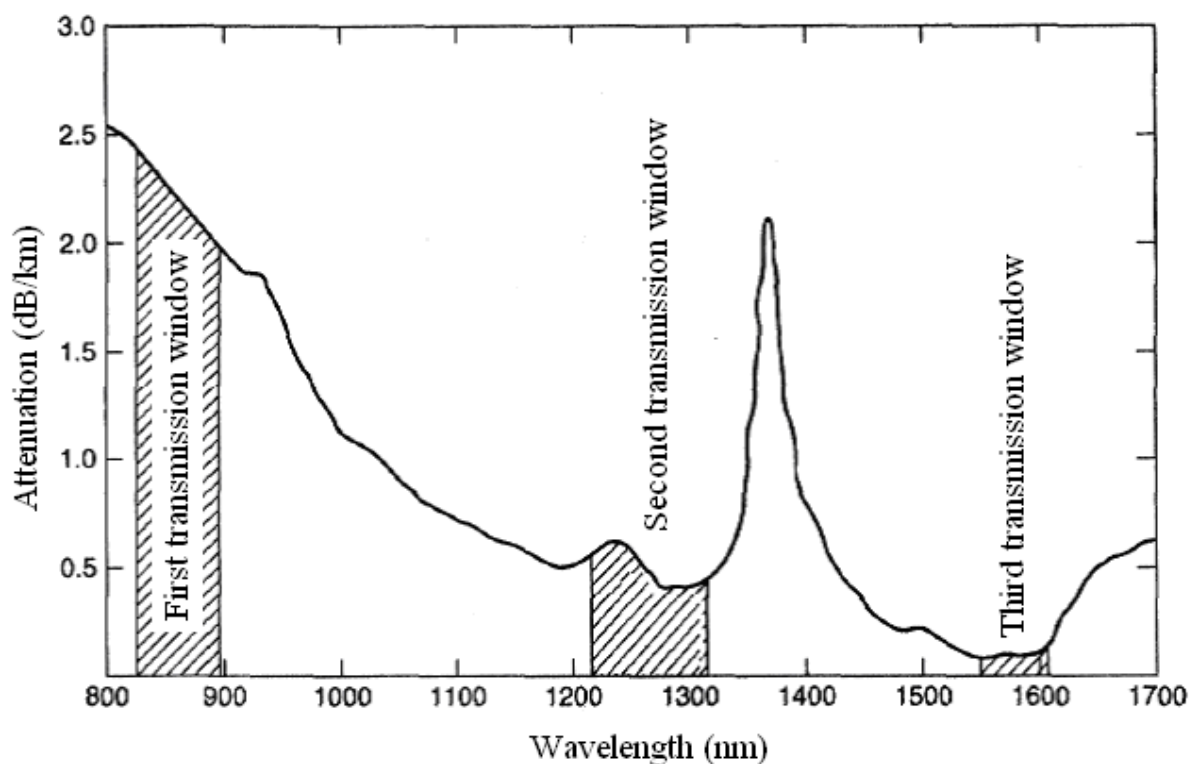


Figure 18 - The attenuation of the optical fiber depending on the wavelength (three transmission windows are used for FOTS)

The physical basis of the light signal transmission through an optical fiber is the phenomenon of total internal reflection (TIR) of light from the interface between two media with different refractive indices. Refractive index of the core n_1 must be greater than the cladding refractive index n_2 ($n_1 > n_2$) for the fulfillment of this condition.

The TIR phenomenon appears only for light ray, which has incident angle above or equal to TIR angle. It can be calculated by the formula (35) (Snell's law).

$$\theta_{\pi} = \arcsin(n_2 / n_1). \quad (35)$$

Figure 19 shows a picture with different incident angles. Figure 19 (a) shows an angle of incidence whereby the refracted light ray is totally out into free space. Figure 19 (b) shows an angle of incidence whereby the refracted light ray begins to propagate along the interface. Figure 19(c) shows the phenomenon of total internal reflection (TIR). This happens when the angle of incidence exceeds the critical angle. The glass OF (which is used for light transmission purposes) requires total internal reflection.

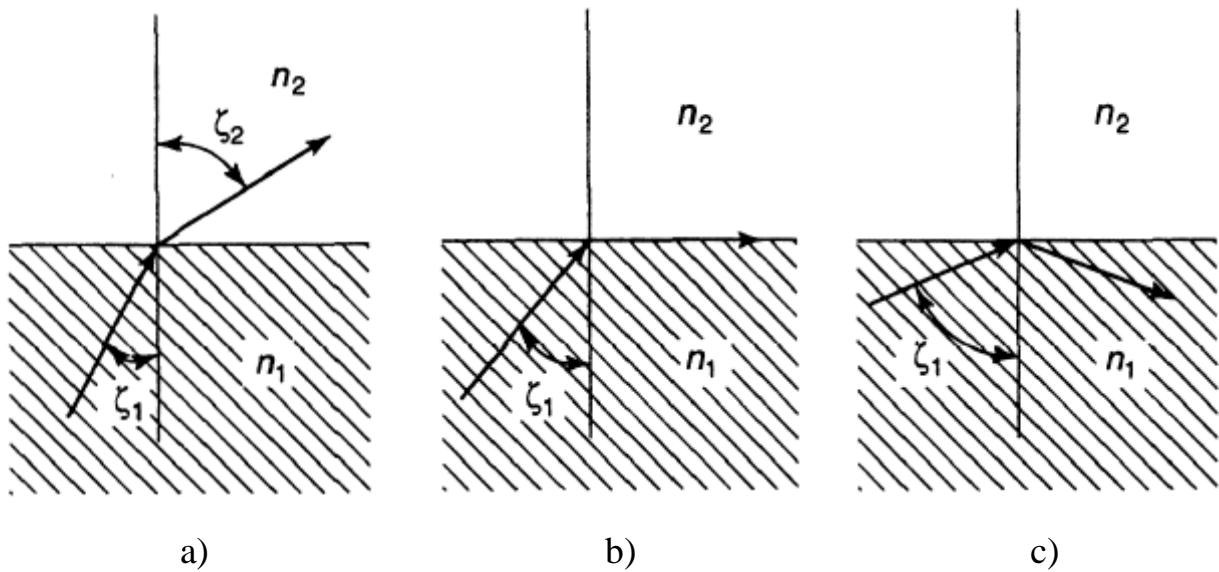


Figure 19 - The path of light rays for some angles of incidence, where n_1 and n_2 are refractive index of two different media [13]

A light ray is introduced into the OF under some angle. Aperture angle θ_a is the maximum angle of light ray which incident into the fiber core. A light ray must be injected into the fiber under an angle of aperture to perform the phenomenon of total internal reflection. The sine of the aperture angle is called numerical aperture, and designated by the letters NA (N-number, A-aperture). Numerical aperture NA is calculated by the formula (36).

$$NA = \sin \theta_a = (n_1 - n_2)^{1/2} \quad (36)$$

According to the formula, it is clear that the numerical aperture depends on the refractive indexes of the core and cladding (Figure 20).

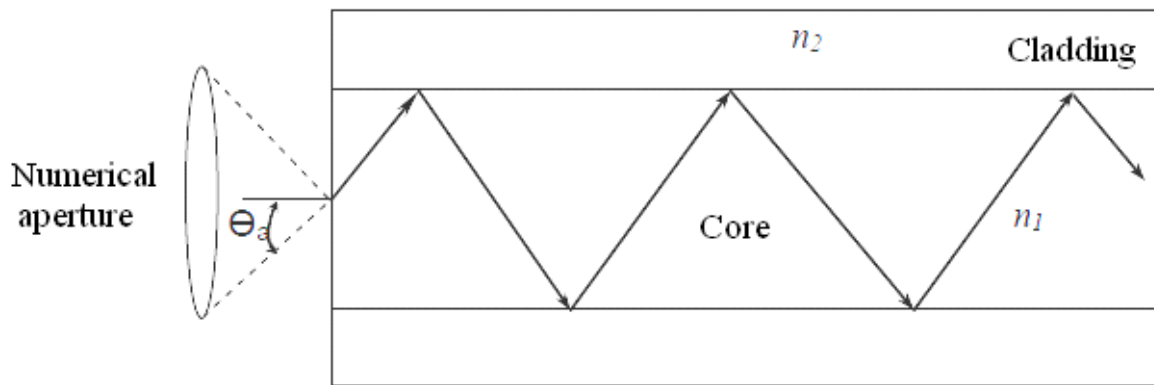


Figure 20 – Propagation of the light ray through an optical fiber. The numerical aperture of the optical fiber

OF is divided into single-mode and multimode, depending on the diameter of its core (Figure 21). As it can be seen, the outer diameter of single-mode and multimode optical fibers is the same and has nominal dimension 125 micrometers. However, a core diameter of single-mode OF is substantially smaller (about 9 microns). While the core diameter of the multimode OF is about 50 microns. These values are reference data. In reality, there are other values of optical fiber diameter.

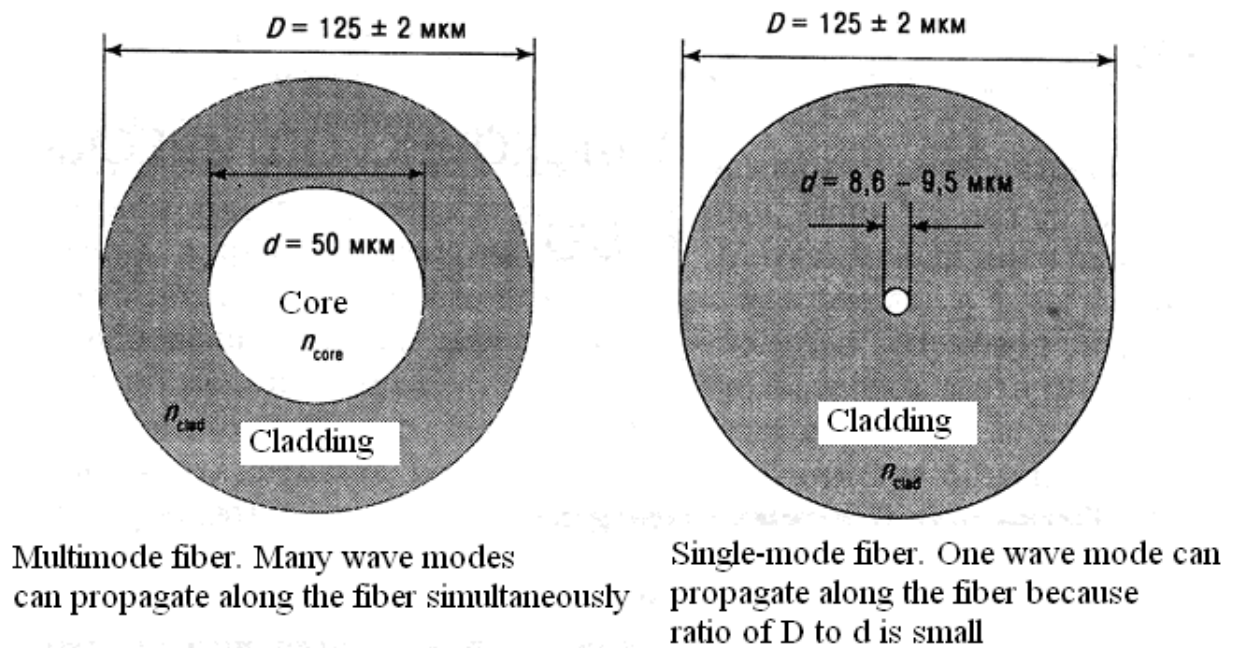


Figure 21 – Cross-sectional view of a multimode (on the left) and single-mode (on the right) fiber

As already mentioned above, multimode fiber has a larger diameter cores compared to single-mode fiber. As a result, a lot of optical mode can propagate along

a light guide. Several of them may propagate over short distances and disappear during propagation. Propagation of the three optical mode of multimode optical fiber is shown in Figure 22. According to this optical fiber segment it can be seen that the lowest order mode reflected by the cladding only two times. But the highest order mode much more often reflected (about seven reflections on this segment). As a result, the energy of the highest order mode is delayed in comparison with the energy of the lowest mode order. As a result, the initial impact is expanding [13].

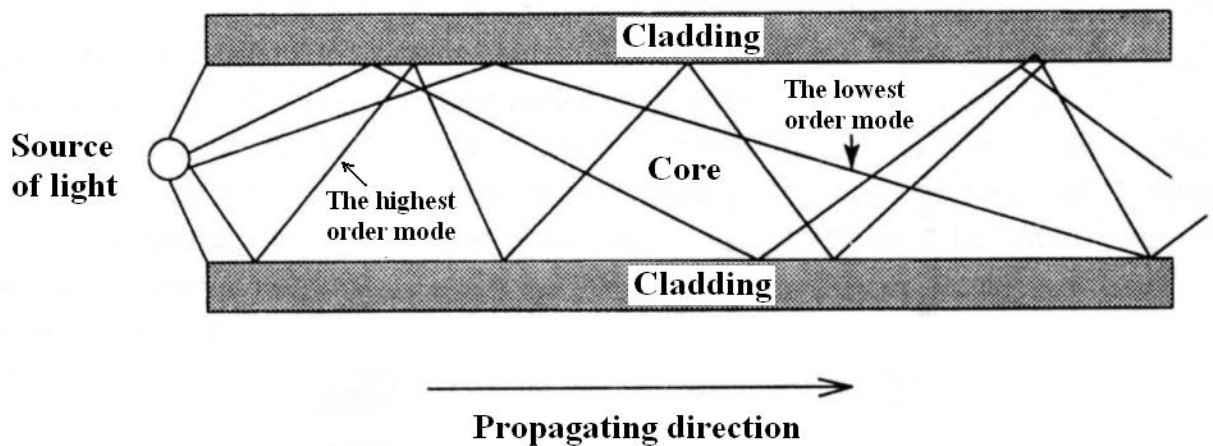


Figure 22 – The light propagation through multi-mode fiber

A single mode fiber is so designed that only one optical mode can propagate through it unlike the multimode fiber. Therefore, mode dispersion is absent in it. The approximate propagation of light through single-mode fiber is shown in Figure 23.

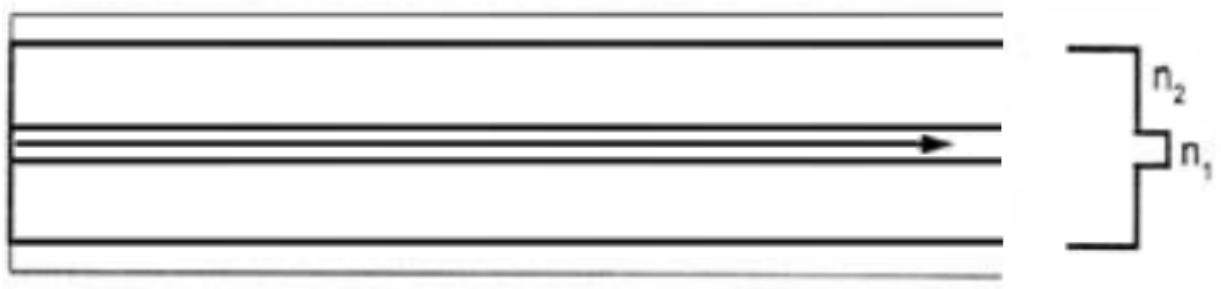


Figure 23 – The approximate propagation of light through single-mode fiber

Comparative characteristics of multimode and single-mode optical fibers are shown in Table 3 [12].

Table 3 – Comparative characteristics of multimode and single-mode optical fibers

Single-mode fiber	Multimode fiber
Almost all rays undergo the same path, so they reach the receiver simultaneously, and the shape of signal is practically undistorted	The trajectories of light rays have a significant spread. As a result, the waveform is distorted on the end of fiber
Single-mode fiber has a core diameter about 9 microns and transmit light along an optical fiber having a wavelength about 1.3 microns	The core has a diameter about 62.5 μm , and the diameter of the outer cladding is about 125 microns. The light wavelength is about 0.85 micron.
Laser transceivers are used for signal transmission. They use only light with a required wavelength	Usual LED (no laser light source) is used for signal transmission
The attenuation coefficient is about 0.5 dB/km, mode dispersion is absent	The attenuation coefficient is about 3 dB/km
The value of numerical aperture θ_a is about 0.11	The value of numerical aperture θ_a is about 0.22
Preassembled length of fiber is about 100 kilometers or more	Preassembled length of fiber is about 2-5 kilometers

Analysis of data in Table 4 shows that we should select single mode optical fiber for purposes of measuring small displacements, because it has low attenuation and signal distortion.

2.2.1 Fiber-optic couplers

Fiber-optic splitters (couplers) are passive elements of FOTS. As the name implies, fiber-optic couplers divide the energy of luminous flux into parts in accordance with a required dividing ratio [14].

The operating range of wavelengths is a range of optical radiation wavelengths for which the parameters of fiber-optic couplers are normalized

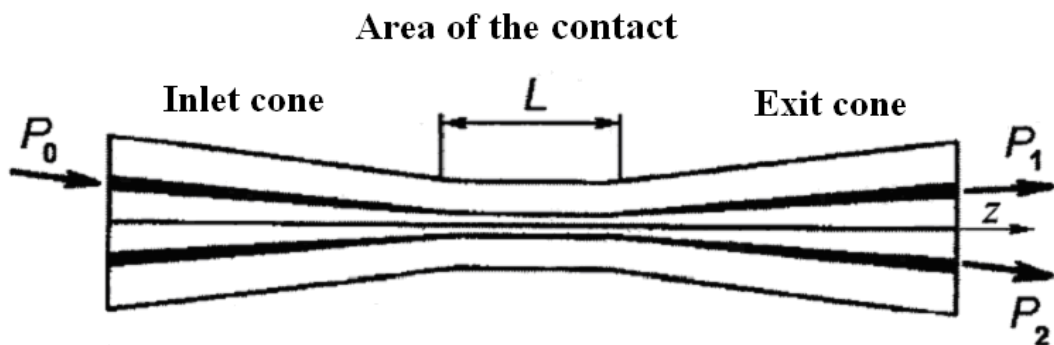
Optical splitters can be classified according to their operating range of wavelengths into:

- single-window (for transmission of any optical signals in one transmission window of an optical fiber, for example, with a central wavelength of 1550 nm);
- dual-window (for transmission of any optical signals in two transmission windows of an optical fiber, for example, with a central wavelength of 1310 and 1550 nm);

- triple-window (for transmission of any optical signals in three transmission windows of an optical fiber, for example, with a central wavelength of 1310, 1490 and 1550 nm);
- multi-window (for transmission of any optical signals in more than three transmission windows).

Optical splitter can be divided into two types according to manufacturing technology: Fused Biconical Taper (FBT) and Planar Lightwave Circuit (PLC).

As the name implies, FBT optical splitters are made by fusing optical fibers. Tunneling effect is used in FBT splitters: the flow of the optical power propagate from the core of the optical fiber into the core through the cladding of another when they are in a tight contact on some "area of the contact" (Figure 24). As can be seen from the figure 24 two cones (input and output) are formed by the fusion of the two fibers. Therefore FBT optical splitters are called biconical couplers [15].



P_0 – power of the input optical radiation; P_1 и P_2 – powers of the output optical radiations; L – length of area of the relationship; z – linear coordinate along the propagating direction of radiation in coupled optical fiber

Figure 24 – Biconical segment of FBT

The desired power split ratio is achieved during the welding process of two fibers (1/99, 3/97, 5/95, 10/90, 20/80, etc.). The main advantage of this type couplers is the possibility of different division of throughput capacity fiber.

Low accuracy dividing of the light energy and the difficulty of creating asymmetric splitters with lots of output optical fibers are disadvantages of FBT technology [15].

Production process of the FBT optical splitters are much simpler than PLC, and this is reflected in their cost. FBT optical splitters are cheaper than PLC splitters. Single-mode optical fibers are used for manufacturing of FBT optical splitters.

Planar splitters are made by using integrated optics techniques. Layers with core and cladding materials are chemically deposited on the silicon substrate alternately. After that, a planar waveguide with necessary configuration is etched through a mask. It is also covered with a reflective material of cladding (Figure 25). In such a way, Y-shaped PLC optical splitter is formed with the division of optical power and 1x2 optical configuration. To manufacture couplers with a larger number of output optical poles it is necessary to collect a cascade of simple Y-shaped planar waveguides. The result is a microoptical circuit. The input and output fibers are attached to it (Figure 26) [15].

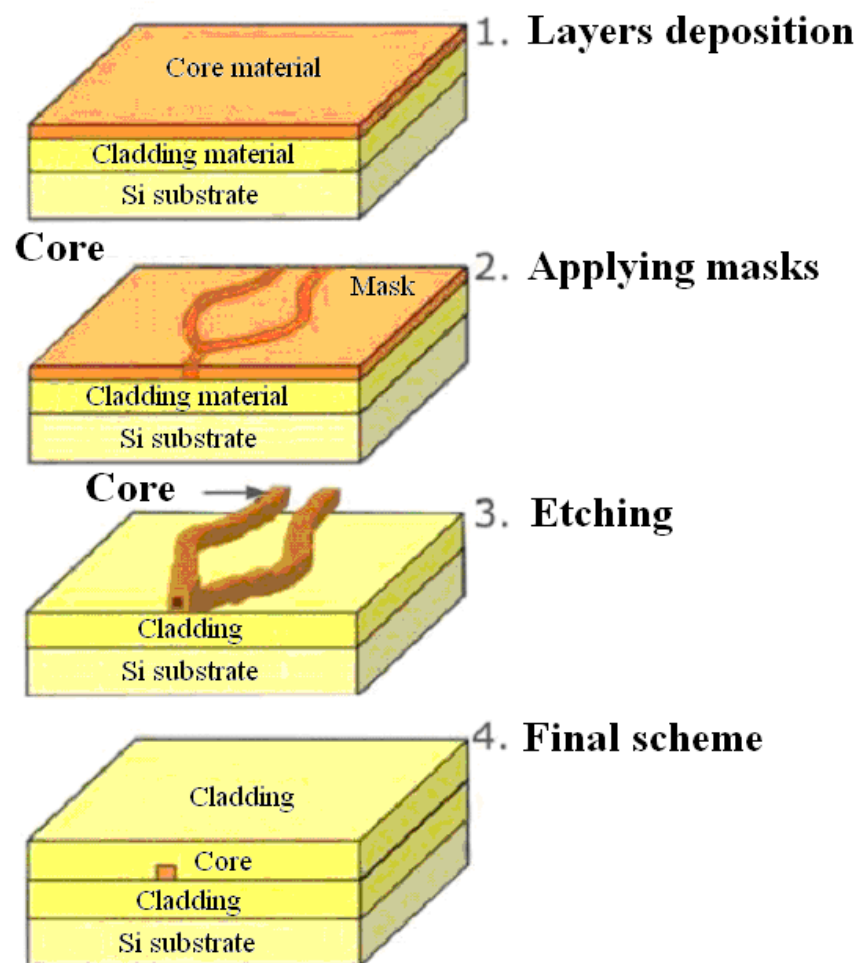


Figure 25 – Production of PLC splitter

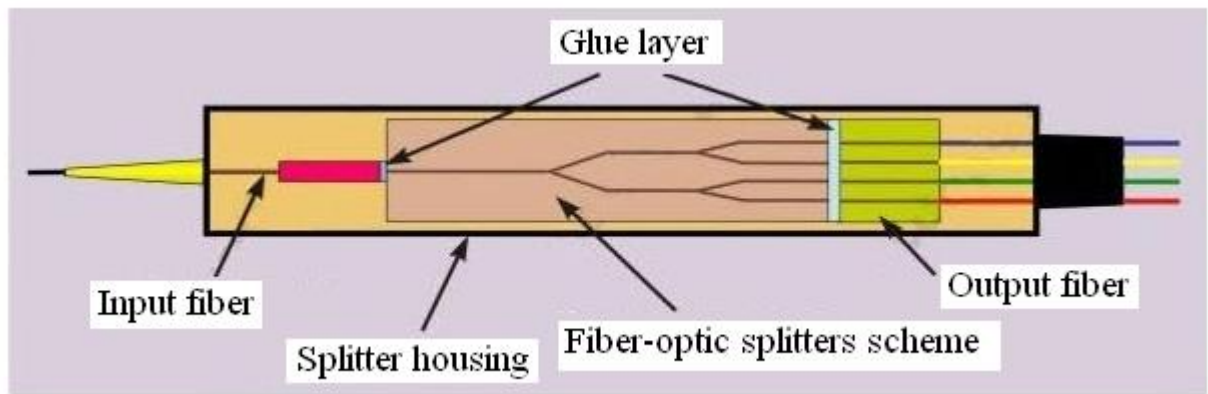


Figure 26 – Microoptical circuit

PLC splitters are made by a more sophisticated technology than FBT and therefore have higher costs.

Manufacturing technology of PLC splitters makes it easier to achieve precision power split. Damping coefficients are almost identical (and lower) in different samples splitters, unlike FBT. However, PLC splitters are less resistant to external destabilizing factors. Moreover, planar splitters divide the signal into equal parts. Number of cable outlets is generally equal to 2^N (2, 4, 8, 16, etc.). However PLC splitters can be made with any number of cable outlets (3, 6) [16].

FBT optical splitters are the most resistant to external influence. As already mentioned above, FBT splitters are made by fusing optical fibers. Comparative characteristics of FBT and PLC optical splitters are shown in Table 4.

Table 4 – Comparative characteristics of FBT and PLC optical splitters

Characteristics	Types of Fiber-optic splitters	
	FBT	PLC
manufacturing technology	simpler	more complex
costs	cheaper	more expensive
mechanical strength	good	satisfactory
The accuracy of dividing ratio	decrease with increasing number of ports	exacting precision
The value of insertion losses in dependence of temperature	low	satisfactory
The division of the optical power	the possibility of unequal division of signal	dividing the signal into equal parts

2.2.2 Optic fiber connectors, types of optical connectors

Any communication system cannot do without interconnecting fibers (regardless of the length of the fiber used).

Optical connectors also are passive elements of FOTS. They are designed for optical connection of the optical poles other components. They also provide the transfer of optical radiation between the optical poles [15].

Optical pole is a place of input (for the input optical pole) or output (the output optical pole) optical radiation.

By their design optical connectors are divided into:

- permanent (one-piece);
- semi-permanent, temporary (demountable).

The first connectors are designed for a one-off connection, and the second connectors are designed for multiple connections of optical poles.

One-piece connectors are divided into welded and mechanical connectors. Fiber welding includes splicing the fiber ends in a continuous permanent connection by welding. Mechanical splicing provides the connection of fiber ends in a permanent connection without welding (the ends of the connected optical fibers are placed in special capillaries or precision polygons).

Welding of optical fibers is based on their exact centering. Then the fibers are welded to each other by means of arc discharge between the electrodes. Centering fibers is performed automatically (application of PAS-system) or by means of V-shaped groove (V-groove) (Figure 27).

Method of centering by means of V-shaped groove seems simpler, but it requires a high quality of fiber geometry for high-quality weld. Figure 28 shows the 3 characteristics of fiber geometry which affect the quality of welding by this method [17].

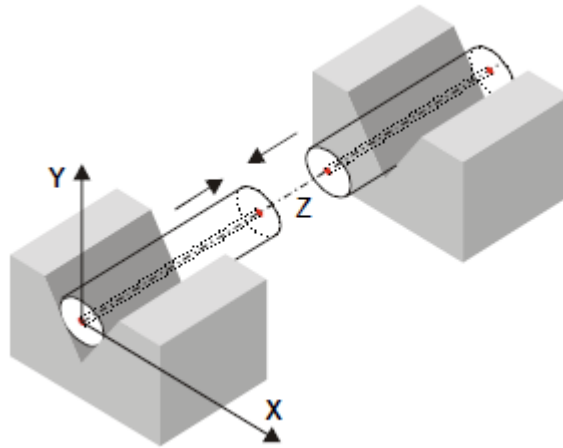
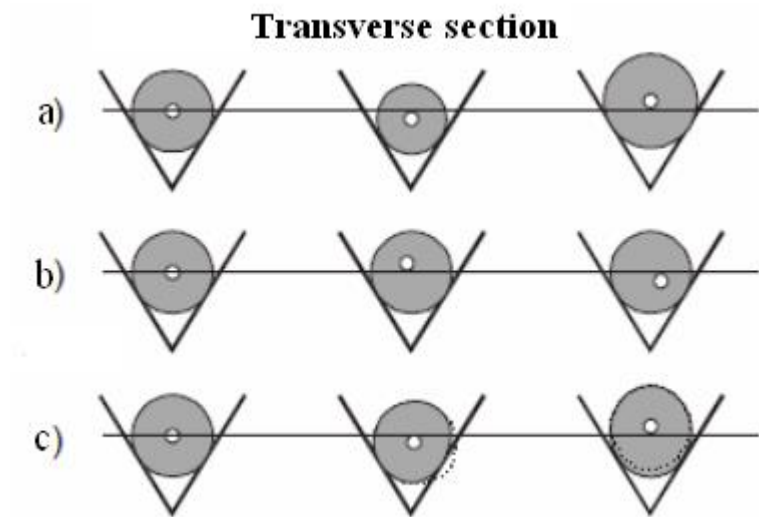


Figure 27 – Welding connections of optical fibers by V-groove



- a) different values of cladding diameter; b) deviation of concentricity of the core/cladding from the norm; c) inhomogeneity of the cladding material (thickening, cavity)

Figure 28 – Influence of the fiber geometry on the quality of welding by means of V-groove

However, if the centering of the fibers takes place automatically, the influence of deviations from the ideal geometry of the fibers in three listed characteristics practically does not degrade the quality of the welding, because it is controlled by the position of the fiber cores.

Thus, the welding provides an inseparable connection. Therefore, it provides the best characteristics as for inserted losses and return losses as compared with a demountable connection.

The need for a demountable optical connectors emerged with the advent of optical fibers, which were suitable for the transmission of information.

Demountable connection of optical fibers provides a multiple connection (up to 1000 cycles) and disconnection of fiber. This is especially important for creating a temporary connection during troubleshooting process and for connecting of measuring devices to a communication line. However, it should be taken into account that optical and mechanical characteristics of the connection can be different for each subsequent on-off cycle. Therefore, optical connectors (sockets) must be sufficiently reliable and provide a permanence of connection parameters within limits during the reconnecting of the fibers.

Optical sockets (or optical adapters) are devices, which are used in construction of networks. They connect different optical fibers. They provide a reliable contact and stable demountable connection.

The design of the optical adapter depends on the type of connector (plug type).

Each fiber end must be terminated with a specific type connector for their connection.

Optical plug is an optical connector, which is mounted at the end of the optical fiber. It allows you to connect optical fibers many times [18].

Nowadays there are a large number of optical connectors on the market. Next, let us consider some of them.

One of them is the **SC-type connector**. The SC connector is believed to be an abbreviation for Subscriber Connector. In addition, specialists sometimes use informal abbreviations expansion, such as Stick-and-Click or Stab Click. This is a fairly good description of the characteristic features of the bottom-type optical connector.

The connector housing of the connector is made of plastic. The tip of the fiber is well protected due to its fuller embracing. Connection and disconnection of the connector is carried out by push-pull principle with smooth linear motion. This principle makes it convenient and easy.

Connector housing has a key. It prevents its connection in the socket when the plug is in the wrong position. Plug latch is opened only when pulling of its connector housing. It increases the operational reliability of the connection created. According to the standards, this connector type can withstand at least 500 cycles of connections and disconnections without impairing of standard characteristics. This is facilitated by the absence of tips turning relative to each other when connecting and disconnecting.

Big plastic connector housing lets you apply a color code of connector type. Connector housing is blue for single-mode connectors. Connector housing is black or beige for multimode connectors. Plug and socket of connector can be made in single and double (duplex) form. The figure 29 shows the plug and adapter of SC-type connector.

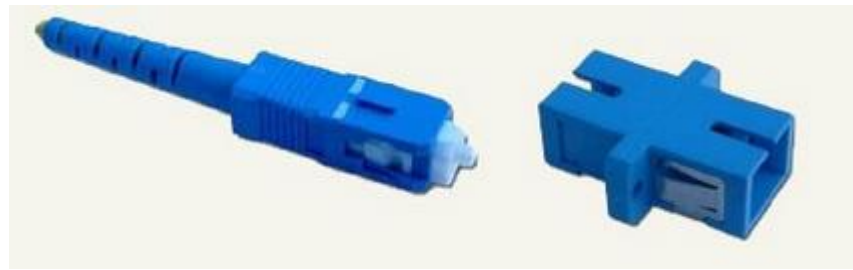


Figure 29 – Plug (on the left) and adapter (on the right) of SC-type connector

Let us consider next the **ST-type connector**. The ST connector is believed to be an abbreviation for Single Termination. In addition, specialists sometimes use informal abbreviations expansion, such as Stick-and-Twist or Stab-and-Twist.

Locking plug in the socket is done by spring-loaded bayonet nut. It rotates 1/4 turn clockwise to be closed. The rotation of the bayonet nut of retainer is accompanied by friction of connected surfaces in the process of connection. This leads to damage of core polishing and increase of signal insertion losses.

Design of ST-connector does not provide the possibility of forming a double plug. Therefore, sockets are mainly available in a single version.

The connector housing of the plug and socket connector are metal and made from nickel-plated brass. This ensures a high mechanical strength. However, this hampers its coding and identification significantly.

The figure 30 shows the plug and adapter of ST-type connector. The figure shows that the tip is quite (about 7,9 mm) protruding from the plug housing. This increases the probability of contamination or damage.



Figure 30 – Plug (on the left) and adapter (on the right) of ST-type connector

Let's consider next the **FC -type connector**. The FC connector is believed to be an abbreviation for Fiber Connector.

Round coupling nut M8h0.75 is used to fix the plug on the socket. This gives great tightness of fiber connection area and connection reliability when exposed to vibrations. It allows you to use this type of connector on moving objects. At the same time, use of a coupling nut for fixing has negative aspects. Firstly, the need to carry out a few turns coupling nut to connect or disconnect. Secondly this makes it impossible to have duplex variant.

FC connector socket is available in two basic varieties. The first type is called the SF and has a square flange and fastening screws M2. The second type is called the RF and has a circular flange and fastening for coupling nut (D-type socket) [18].




The figure 31 shows the plug and adapter of FC-type connector (D-type socket).



Figure 31 – Plug (on the left) and adapter (on the right) of FC-type connector
(D-type socket)

Table 5 shows some characteristics of the optical connectors FC, SC and ST mentioned above [17].

Table 5 – Some characteristics of the optical connectors FC, SC and ST

Appearance connector							
Type		FC		SC		ST	
Designation		FC/ PC		SC MM	SC SM	ST MM	ST SM
Physical characteristics							
Connection type		Carving M8x0.75, key		Latch lock (design push-pull)		Bayonet lock with a key	
Docking		Rounded end, physical contact, floating tip, design without tightening of cable				Rounded end, physical contact, the spring-loaded tip	
Compatible fiber		SMF: D/125 μm		MMF: 50/125; 62,5/125 μm	SMF: D/125 μm	MMF: 50/125; 62,5/125 μm	SMF: D/125 μm
Optical characteristics							
Insertion losses	FLAT	< 1.0 dB	—	—	—	—	
	PC	< 0.5 dB	< 0.25 dB	< 0.5 dB	< 0.7 dB	< 1.0 dB	
	SPC	< 0.5 dB	< 0.25 dB	< 0.5 dB	—	< 0.7 dB	
	UPC	< 0.5 dB	—	< 0.5 dB	—	< 0.7 dB	
	APC	< 0.5 dB	—	< 0.5 dB	—	—	
Return losses	FLAT	< 1.0 dB	—	—	—	—	
	PC	< 1.0 dB	< -22 dB	< -27 dB	—	< -30 dB	
	SPC	< 1.0 dB	< -36 dB	< -40 dB	—	< -40 dB	
	UPC	< 1.0 dB	—	< -50 dB	—	< -50 dB	
	APC	< 1.0 dB	—	< -60 dB	—	—	
Designations: SMF - single-mode fiber, MMF - multimode fiber, D - diameter of SMF core (from 8 to 10 μm), FLAT - flat end, PC - spherical end, SPC - spherical end, UPC - spherical end, APC - spherical corner end							

All types of connecting sockets (FC, SC, ST, or LC) are used to create connections between optical fibers that are equipped with certain sockets (connectors).

It is not always easy to decide which method (demountable or welded) is the most suitable and the best for a specific task. It is necessary to take into account the advantages and disadvantages of each type of connection with the general requirements of the system as a whole. The table 6 shows the advantages of these types of connection.

Table 6 – Advantages of demountable and welded connections

Advantages of demountable connection	Advantages of welded connections
There is a gap	Continuous connection
Simple connection/disconnection of system parts	Lower insertion loss
Easy system reconfiguration	Lower return loss
It is provided by standard connector types	Tightness is achieved easier
The separation system without damaging parts	Less expensive per one connection
Connectivity in the field	More compact per one connection

2.2.3 Types of polishing

Contact-type connector generally involves the direct connection of the connected elements (not fibers themselves). Air gap may occur between the abutting optical fibers unless special measures are taken. It may cause Fresnel reflection effect and the formation of a cone-shaped radiation beam. These effects are some of the reasons for the increased losses in demountable connectors [18].

Polishing is aimed to ensure dense contact between the cores of optical fibers. However, attainment of dense contact between flat shaped fiber ends is practically impossible due to finite precision of tip-machining equipment. As seen in Figure 32, attempt to connect the connector with the flat end is fraught with the appearance of the air gap. Back reflection is about -14 dB.

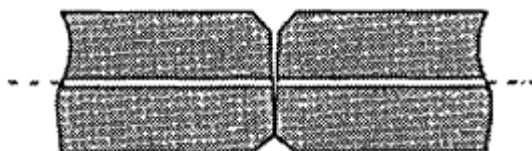


Figure 32 – The flat shape of the fiber ends

The optical connector must be implemented according to the scheme of so-called **physical contact (PC)** in order to minimize losses. This scheme is based on forced snug fit between the fiber cores. Connector which processed by PC method (including manually) has a rounded tip. The distance between the cores of fiber ends is much smaller than the wavelength of the transmitted radiation. Back reflection is

about -25 dB. Therefore, this type of polishing is used for signal transmission over short distances and at low speeds.

Hand polishing of PC does not give the best insertion loss values (typical insertion loss for single mode fiber is about 0.2 dB). Therefore, the manufacturers continued to search for new methods of grinding. Two types of grinding were developed **Super Physical Contact** (SPC) and the **Angled Physically Contact** (APC).

The only difference of PC from the SPC polishing is that SPC polishing type is made by a machine. Therefore, it has a higher quality. Reflectivity is in the range of -40 dB [19].

APC connector type is processed entirely on a different principle. Its fiber end is chamfered and polished at an angle of 8°. Back reflection almost immediately leaving OM, thereby reducing losses (Figure 33). Reflectivity may be about -60 dB or -65 dB. Since signal reflection is less than one ten-thousandth, the APC connectors are generally used to implement the most demanding systems [20].

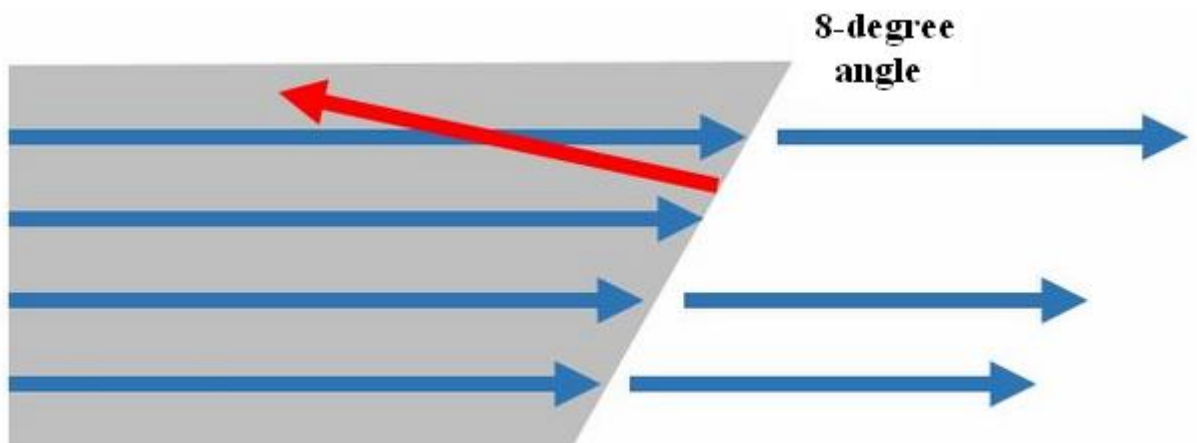


Figure 33 – The shape of the fiber end and the reflected signal path from the APC connector polishing

The latest version was developed with **Ultra Physical Contact** (UPC) type of polishing. The end of this fiber is almost flat and is produced with the use of certain machine technologies. Reflectivity is about -50 dB because of high-precision surface machining. This is slightly worse than values that APC connectors show, but it is

better than the PC and SPC have. Figure 34 shows the shape of the fiber end and the reflected signal path from the UPC connector polishing.

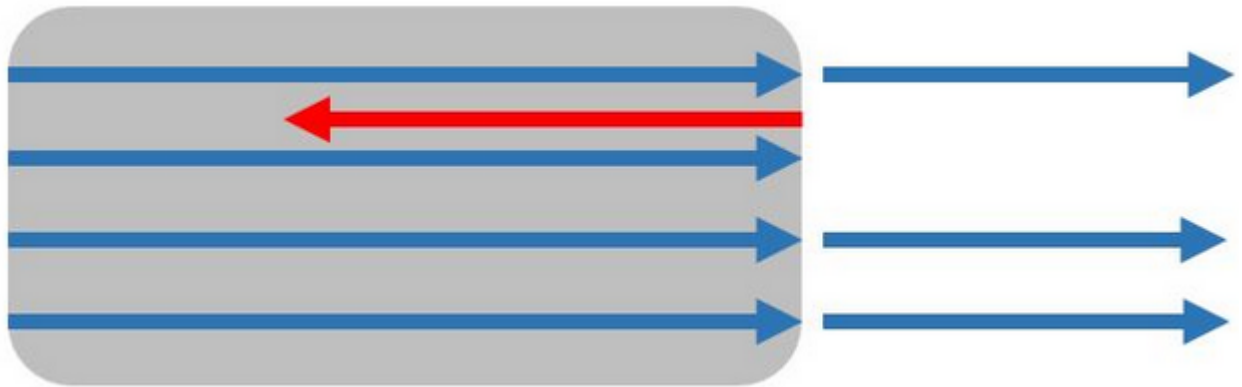


Figure 34 – The shape of the fiber end and the reflected signal path from the UPC connector polishing

When designing fiber optic links an engineer should be aware that APC connectors cannot be connected to other types of polishing (PC, SPC, UPC) due to the design features of the fiber ends. It causes their mutual damage. However, such polishing as PC, SPC, UPC are mutually compatible.

The table 7 is a summary table of the insertion loss and back reflection of signal depending on type of polishing of fiber optic connectors.

Table 7 – Polishing types

Polishing	Insertion loss, dB	Back reflection, dB
PC	0,2	-25...-30
Super PC	0,2	-35...-40
Ultra PC	0,2	-45...-50
Angled PC	0,3	-60...-65

2.2.4 Loss and attenuation in the optical fiber

Signal gradually loses its energy during propagation along a light guide, in other words, it is attenuated. The attenuation coefficient is independent of the emission intensity. The value of this parameter is one of the main factors that determines the maximum distance between the radiation receiver and the radiation source.

There are four reasons of the losses in the optical fiber:

- inherent internal losses;
- loss caused by impurities (external absorption loss);

- Rayleigh scattering;
- losses due to imperfections of the fiber.

Inherent internal absorption of material is the loss caused only by pure silicon. Each specific material has its own fundamental attenuation of light. There is a signal absorption of certain wavelengths because of its molecular structure (even when the ideal microstructure and total absence of impurities). Of the variety of silicate glasses, pure silica glass is distinguished by a minimum fundamental weakening (sum of the light losses in the absorption and scattering). It consists of 100 % SiO₂. Fundamental weakening of the glass is about 0,16 dB/km at the wavelength $\lambda=1,55$ m. For silica there are electronic resonances in the ultraviolet (UV) region for wavelengths $\lambda < 0,4$ microns. In addition there are also vibrational resonances in the infrared (IR) region for wavelengths $\lambda > 7$ microns. Molten silicon dioxide (SiO₂) is a material of the optical fiber and it is amorphous in itself. Therefore these resonances exist in the form of the absorption bands. Manufacturers of optical fiber cannot influence over this component of absorption, except to change the material of light signal transmission to another [13].

There are light losses in materials for optical fibers along with the fundamental sources of light attenuation. Such **external absorption loss** is due to the presence of impurities [21]. In general, these sources of light attenuation are abnormal, improper, that is completely avoidable in principle. Currently, modern manufacturing techniques have reduced the contribution from these losses to a low level. Transition metal ions, hydroxyl ions OH, metallic and non-metallic inclusions (such as iron, copper, nickel, magnesium and chromium) refer to extrinsic sources of light attenuation. In the process of production content of impurity metals has been reduced to less than one-billionth part. Thus, manufacturers achieved relatively small contribution of these losses to the common external absorption loss. In contrast, the losses due to having hydroxyl ions OH are caused by the presence of water in the fiber remaining in the manufacturing process. These impurities also have to be reduced to a minimum. Because even a small part as one millionth, can cause the loss of 50 dB at the wavelength $\lambda = 1390$ nm.

One of the intractable losses is the **Rayleigh scattering**. It is due to the presence of small-scale (compared to the wavelength of radiation) fluctuations in density, chemical composition of the material and variations in the concentration of molecules. These fluctuations are due to imperfections in the internal structure of the fiber (the presence of air bubbles, irregularities and cracks) that occur during glass-transition. The resulting imperfections cause nearly isotropic Rayleigh scattering, which is inversely proportional to the wavelength of the fourth degree λ^{-4} . So, the larger the wavelength, the smaller will be the impact of Rayleigh scattering on the total attenuation in the fiber. Theoretically, the levels of Rayleigh losses should be about 0.15 dB/km at the wavelength of 1550 nm (for quartz) [22].

Imperfections of optical fiber are another reason for the loss in the optical fiber, which include loss of microbending and macrobending (Figure 35).

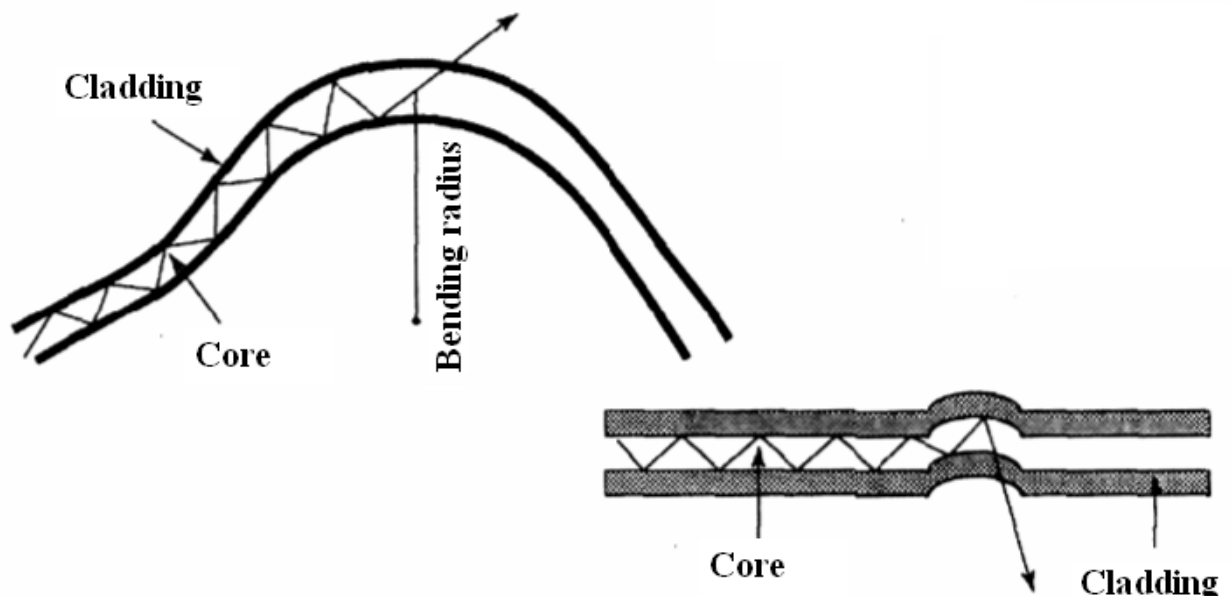


Figure 35 – Figure shows macrobending (left) and microbending (right)

Macrobends associated with some specific small radius. We sometimes intuitively suggest that if the fiber is bent, losses are occurred in the transmission path. However, it is not so. Losses occur only when the value of bending causes the light rays to fall at an angle less than the critical. This can happen if a beam of light falls directly on a bend at an angle less than the critical (Figure 36) or if the beam is reflected from the bend, and then it enters the cladding at an angle less than the critical [23].

Cable manufacturer should specify a norm of minimum bend radius during installation in the specification for this particular fiber-optic cable. This value indicates the minimum permissible bending radius of the inner cable after its installation. Stacker should not reduce the bend radius less than the minimum, as this can cause a significant increase of fiber attenuation.

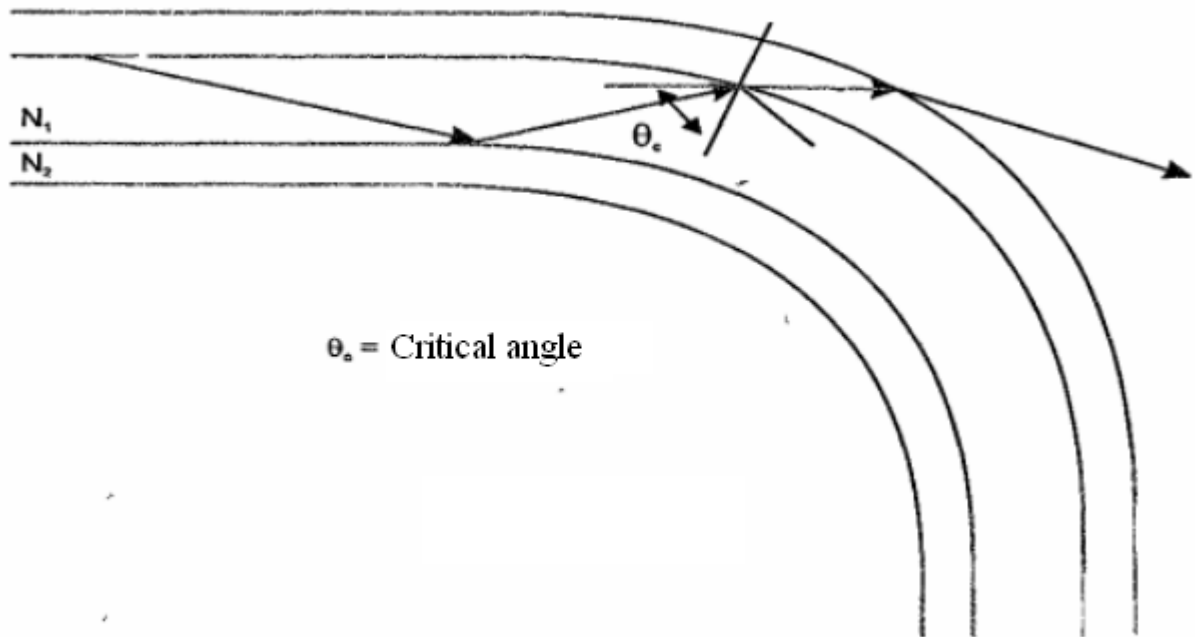


Figure 36 – Losses due to macrobends

The second kind of losses due to bends is called *microbending*. Microbends takes the form of very small sharp bend (kink) of cable. The presence of a continuous sequence of microbends can cause very significant increase of fiber losses. It may exceed 100 dB/km in some cases. Microbends may arise during manufacture of optical fiber, as well as due to external forces (heavy sharp objects, placed on the cable, a jamming of cable). Small variations in the profile of the border core/cladding (imperfect cladding, undulation of the core/cladding surface, tiny cracks fibers) can cause to the occurrence of microbending. As in the case of macrobending, the light beam will fall below the critical angle and penetrate into the cladding (Figure 37).

All described above causes of light loss have an effect on the energy balance in the fiber system to a varying degree (depending on its length, the method of branching the cables, amount of splitters, method of laying the cable and its possible kinks and so on) [22].

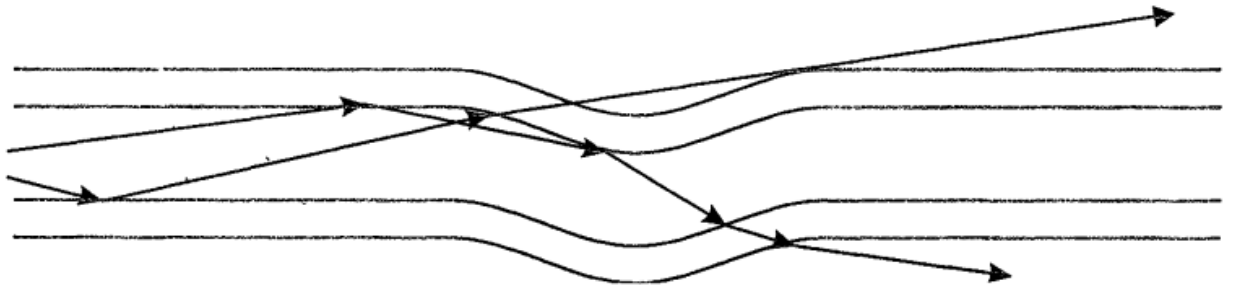


Figure 37 – Losses due to microbends

